

NOTE DE SYNTHÈSE

Veille sur les risques induits par H₂S en géothermie profonde

Novembre 2022

L'hydrogène sulfuré (H₂S) est un gaz naturellement présent dans les gîtes géothermiques profonds mais également dans les gisements de charbon, de pétrole ou de gaz naturel, ainsi que dans les émissions volcaniques¹. Il est également émis par de nombreuses activités industrielles comme l'industrie pétrolière (raffinage, cracking des pétroles riches en soufre), la vulcanisation du caoutchouc, la fabrication de la viscose, la transformation de produits alimentaires, les papeteries, les tanneries, etc. Il est enfin présent dans les égouts, les stations d'épuration ou encore les décharges d'ordures ménagères.

Il s'agit d'un gaz dangereux car très toxique et inflammable. A faible teneur dans l'air, il possède une odeur caractéristique d'oeuf pourri qui permet d'avertir de sa présence mais qui disparaît par anesthésie de l'odorat à partir de 150 à 200 ppm en volume (Tissot et Pichard, 2000). A partir de 1000 ppm, une seule inspiration suffit pour perdre connaissance puis, au-delà de cette teneur, la mort peut survenir en quelques minutes.

En 2013, la base de données ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents) recensait 302 morts et plus de 150 000 personnes intoxiquées par inhalation d'H₂S dans le monde. Avec 18 morts et une centaine de blessés cumulée sur six décennies, la géothermie profonde² n'est pas une industrie fortement impactée par ce gaz. Néanmoins, il s'agit là d'une des principales causes de décès au sein de cette filière, loin devant la survenue de séismes qui défraient souvent la chronique.

C'est pourquoi une opération de veille sur les risques induits par la géothermie profonde autres que ceux liés à la sismicité induite a été mise en place dans le cadre du programme d'appui à la maîtrise des risques et impacts liés à l'exploitation du sous-sol par forage et aux stockages souterrains de l'Ineris auprès du ministère chargé de l'environnement. L'objectif de cette opération pour l'année 2022 est de faire un premier retour d'expérience international de ces accidents à partir des informations disponibles dans le domaine public.

Dans la présente note, nous abordons les risques d'émissions de gaz toxiques, principalement H₂S, à partir d'un

retour d'expérience international constitué de descriptions d'accidents disponibles en libre accès dans le domaine public. Nous présentons également une base de données précisant, pour chaque cas identifié, les circonstances et l'origine du phénomène d'émission de gaz toxiques.

Présence d'H₂S en géothermie profonde

Dans les gîtes géothermiques profonds, le fluide géothermal naturellement présent se trouve à forte pression (quelques bar à dizaines de bar) et peut ainsi renfermer d'importantes teneurs en gaz. Lors de la mise en exploitation des gîtes, une partie de ces gaz peut être libérée dans l'atmosphère de manière chronique ou accidentelle. Il s'agit très majoritairement de vapeur d'eau (>90 % en volume), généralement condensée et réinjectée dans le réservoir géothermal après extraction de la chaleur, ainsi que d'une phase non condensable essentiellement formée de CO₂ accompagné d'autres gaz tels que H₂S, H₂, CH₄, NH₃, N₂, Rn et des traces de vapeur de mercure (Tableau 1).

¹ https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/uploads/2013/07/16-17-analogie_rejet-H2S.pdf (consulté le 29/06/2022).

² Terme regroupant la géothermie pour la production d'électricité et celle à usage direct pour la production de chaleur qui nécessitent toutes deux des forages généralement profonds de quelques kilomètres (Gombert et al., 2016). La géothermie de faible profondeur, encore appelée de très basse énergie, qui exploite la chaleur à basse température (le plus souvent dans la première centaine de mètres du sous-sol) et qui nécessite une assistance par pompe à chaleur, n'est pas concernée ici.

	Median ¹	Maximum ¹	Minimum ¹	GHG	Toxic	Odor	Corrosive	Flammable
CO ₂	95.4	99.8	75.7	Yes				
H ₂ S	3.0	21.2	0.1		Yes ²	Yes ²	Yes	Yes
CH ₄	0.15	1.7	0.0045	Yes				Yes
H ₂	0.012	2.2	0.001					Yes
NH ₃	0.29	1.8	0.005		Yes	Yes		
N ₂	0.84	3.0	0.17					
Ar	0.02	0.04	0.004					
Hg, B, Rn	Trace				Yes			

Tableau 1 /
Composition des gaz issus de la géothermie profonde et impacts potentiels (Fridriksson, 2016)
(Teneurs en % volumique de gaz sec, ¹ d'après Arnorsson et al. (2007),
² gaz potentiellement léthal)

Dans le cas des gîtes géothermiques profonds, comme par exemple en Alsace, les émissions de gaz proviennent essentiellement de la mise en exploitation du gîte car le réservoir est normalement isolé de la surface. En revanche, dans les gîtes géothermiques plus superficiels de type volcanique, comme en Islande ou en Guadeloupe, ces gaz sont émis de manière naturelle : la mise en exploitation de ces gîtes ne fait qu'accentuer ce mécanisme en amenant en surface plus de fluide géothermal qui va alors dégazer au niveau des condenseurs et des turbines. Ces émissions sont surtout mesurables pour les deux principaux gaz condensables que sont CO₂ et H₂S : ainsi, en Islande, leur flux issu des sites géothermiques exploités représente près du tiers du flux total de CO₂ et plus de 60 % de celui du H₂S émis par le pays (Kristmannsdottir et Armannsson, 2003). C'est probablement l'une des raisons qui explique que, outre les cas d'intoxications graves mentionnés dans la base de données, de nombreux riverains de sites géothermiques exploités se plaignent de nuisances olfactives³, voire de symptômes légers (maux de tête, nausées).

Présentation de la base de données

Description

Une cinquantaine de documents concernant des émissions accidentelles de H₂S survenues dans le domaine de la géothermie profonde ont été consultés. Après analyse, 32 cas ayant eu des impacts sanitaires ou ayant généré des problèmes techniques ou administratifs (arrêt des travaux) ont été retenus. Ils sont présentés sous forme de tableau synthétique dans une base de données Excel (présentée en Annexe 1) ainsi que sous forme de fiches (présentées en Annexe 2).

La base de données contient les informations (colonnes) suivantes :

- / une référence comprenant les 4 chiffres de l'année de l'accident/incident suivis des 3 lettres représentant le pays concerné d'après le code international (ISO 3166-1 alpha-3) ;

- / le nom du pays, la région concernée et le nom du site ou du projet géothermique ;
- / le type de centrale géothermique concerné (chaleur, électricité ou centrale mixte) ;
- / la date de l'évènement accidentel (à la précision du jour, du mois ou de l'année) ;
- / le nombre de victimes (morts et/ou blessés) ainsi que les autres dommages survenus ;
- / la phase de vie du projet géothermique (exploration, test/développement, exploitation) ;
- / la description détaillée de l'évènement survenu et de ses conséquences ;
- / la (ou les) référence(s) bibliographique(s) consultée(s).

Données statistiques globales

La base de données concerne actuellement les 8 pays suivants (Figure 1) : États-Unis, France, Indonésie, Islande, Japon, Kenya, Nouvelle-Zélande et Philippines. À noter que 88 pays⁴ produisent de la chaleur géothermique et 29 pays produisent de l'électricité géothermique. Ainsi, d'importants pays producteurs d'énergie géothermique comme la Chine, la Suède, la Turquie, l'Italie, le Mexique, l'Allemagne, le Canada, la Suisse ou la Norvège ne sont pas représentés ici, sans qu'on sache s'il s'agit d'une absence d'évènement notable ou d'un manque d'information à ce sujet.

On constate également que certains sites sont mentionnés à plusieurs reprises (14 évènements signalés sur le site de Puna à Hawaï, 3 sur celui de Hengill en Islande, 2 sur celui de Sibanggor Julu en Indonésie) sans qu'on puisse distinguer si cela résulte d'une sensibilité particulière de ces sites ou d'une diffusion plus grande des informations disponibles.

Bien que l'exploitation industrielle de l'énergie géothermique date de la fin du 19^e siècle pour la production de chaleur, les premiers évènements liés aux émissions de H₂S ne sont signalés qu'en 1962 (Rotorua, Nouvelle-Zélande). En ce qui concerne la production d'électricité géothermique, elle débute au cours de la seconde moitié du 20^e siècle mais les premiers évènements liés aux émissions de H₂S ne sont signalés qu'en 1976 (Figure 1).

³ Notamment, en France, sur le site de la centrale de Bouillante en Guadeloupe (<https://unt.univcotedazur.fr/uved/bouillante/cours/ii.-etude-de-cas-la-centrale-geothermique-de-bouillante-enguadeloupe/2.-contexte-economique/2.2.-impact-sur-lenvironnement/la-centrale-geothermique-genere-telle-des-pollutions.html>)

⁴ <https://geothermie-schweiz.ch/geothermie/weltweit/?lang=fr#:~:text=88%20pays%20produisent%20aujourd'hui>

Analyse des événements recensés

Causes

En ce qui concerne les phases de réalisation ou de test des forages, on peut citer les cas suivants :

- / en 1991, à Puna (Hawaï, USA), le trépan du forage KS-8 a rencontré plus tôt que prévu une fracture remplie de fluide géothermal sous pression (soit la profondeur de la zone sensible n'avait pas été bien évaluée, soit le foreur n'avait pas correctement estimé l'avancement en cours de foration) ; ce fluide est rapidement remonté dans le forage et, à une certaine profondeur, une partie s'est transformée en vapeur (dont du H_2S), violemment expulsée vers la surface ;
- / en 1995 à Kakkonda (Japon), la boue d'un forage géothermique a vu sa composition et ses propriétés se dégrader à la traversée d'une zone de forte variation du gradient de température ; la boue s'est alors chargée en CO_2 et en H_2S , puis a ensuite dégazé dans le bac de retour en surface ;
- / en 2022, sur le site géothermique Geo Dipa à Dieng (Indonésie), un forage en cours de creusement a émis du gaz renfermant du H_2S lors de la vérification de la soupape de sécurité d'une pompe à boue ;
- / en 2014, à Billiran (Indonésie), des ouvriers ont été intoxiqués par un dégazement brutal de H_2S en phase de test (développement) d'un forage géothermique.

Dans les sites en exploitation, de nombreux événements ont eu des conséquences graves. Hormis un cas mal établi survenu en 1998 au Japon (où un ouvrier est décédé après avoir pénétré dans une salle où stagnait du H_2S), les causes peuvent être regroupées en 5 grandes familles :

- / de faibles émissions d' H_2S , préalablement accumulé dans des installations géothermiques, à l'occasion de leur purge ou de leur maintenance :
 - en 2007, à Hengill (Islande), au cours d'un programme de redémarrage de la centrale, la pression s'est accumulée dans les collecteurs de condensat et les vannes de décharge se sont ouvertes, libérant dans le hall des machines du H_2S (lequel était resté dans les condenseurs après l'arrêt de la centrale) ;
 - en 2008, à Hengill (Islande), l'atmosphère interne du réservoir d'un évaporateur de vapeur manquait d'oxygène et renfermait du H_2S ; l'accident est survenu après que des ouvriers aient découpé un trou d'homme sur le côté du réservoir ; le même type d'accident est également survenu au Kenya, à une date et dans un lieu non précisés ;
 - en 2020, en Nouvelle-Zélande, dans une installation de séchage du bois par chaleur géothermique, une équipe de maintenance a été intoxiquée par de l' H_2S émis par un ancien puits géothermique abandonné et non rebouché, présent sur le site ;

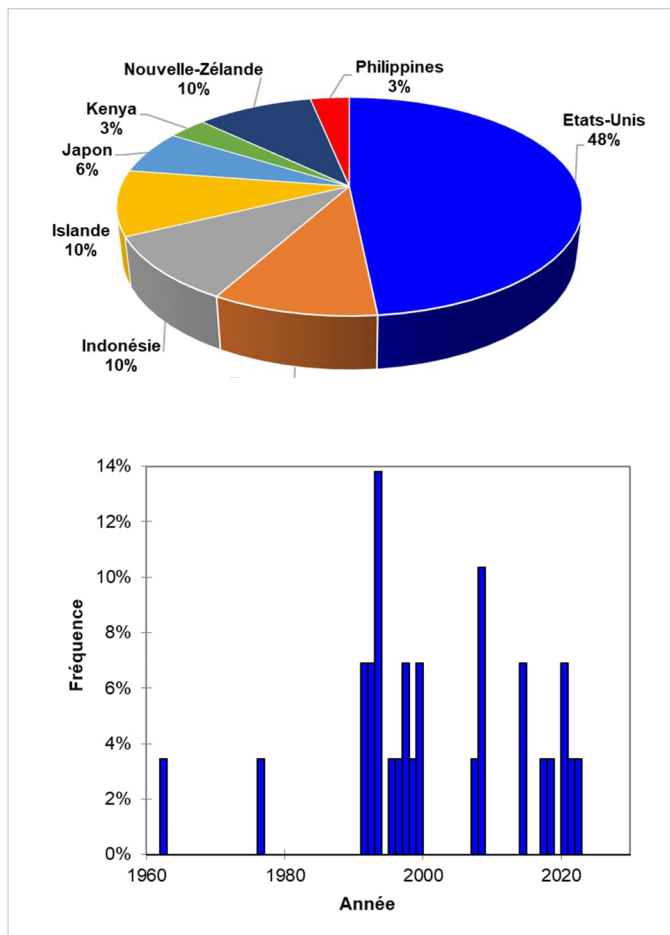


Figure 1 / Distribution des émissions accidentelles d' H_2S par pays (à g.) et par année (à d.)

Filières géothermiques et phases de vie concernées

Les filières concernées correspondent aussi bien à des sites de production de chaleur que d'électricité géothermique, ces derniers étant généralement plus profonds (>1 km) et donc plus chargés en gaz dissous. L'émission de H_2S semble donc être une constante dans le domaine de la géothermie profonde.

Dans les documents consultés, lorsque la phase de vie du projet géothermique est mentionnée, les problèmes sont majoritairement signalés en cours d'exploitation (63 %), quelques-uns en cours de foration (33 %) et, plus rarement, lors des phases de test ou de développement (1 %). Il s'agit là d'une différence notable par rapport à d'autres types d'événements redoutés comme les séismes induits, lesquels se produisent le plus souvent en phase de foration ou de développement des ouvrages géothermiques.

Ces deux constats s'appliquent notamment à la France où les trois seuls problèmes signalés sont apparus en phase d'exploitation de centrales géothermiques de production de chaleur.

/ des dysfonctionnements des systèmes de sécurité créant des émissions plus importantes :

- en 1996 à Puna (Hawaï, USA), un dysfonctionnement de la vanne de contrôle du niveau du séparateur a causé une perte de lubrifiant qui a entraîné un déversement de vapeur renfermant de l' H_2S ;
- en 2014, sur le site de Puna (Hawaï, États-Unis) un dégagement incontrôlé de H_2S est survenu dans l'usine de production géothermique de Puna Geothermal Venture ;
- en 2017 à Sucy-en-Brie (France), une importante remontée de dépôts solides par la ligne de production a créé une brutale montée en pression qui a généré l'ouverture d'une soupape de sécurité ; ces dépôts ont ensuite bloqué la soupape en position ouverte, ce qui a généré l'accumulation de fluide géothermique et son dégazage avec émission de vapeur d'eau chargée en H_2S par les orifices de ventilation ;
- en 2022 à Dieng (Indonésie) où un puits en cours de foration a libéré des gaz toxiques renfermant du H_2S lorsqu'un ouvrier a vérifié la soupape de sécurité d'une pompe à boue ;

/ la propagation à une distance anormalement importante d'un panache gazeux renfermant du H_2S :

- en 2021, sur le site de Sorik Marapi (Indonésie) où, lors d'une manoeuvre classique de « décharge de puits », un panache de H_2S s'est répandu par l'événement du silencieux pendant trois minutes avant que ne sorte la vapeur d'eau attendue ; ce panache s'est dirigé vers des villageois qui travaillaient dans une rizière entre 300 et 500 m de distance ;
- en mars 2022 à Sibanggor Julu (Indonésie) où un panache de H_2S a atteint des ouvriers et des villageois dans les alentours ;
- en avril 2022 à Sibanggor Julu (Indonésie) où deux puits en cours de foration ont émis de la boue chaude ainsi que du gaz contenant de l' H_2S en direction du village voisin.

/ la trop grande proximité d'ouvriers ou de riverains par rapport à un point d'émission de H_2S :

- en 1962, à Rotorua (Nouvelle-Zélande), dans une ville implantée sur une zone géothermique où le chauffage des maisons provient directement de nombreux puits, des cas accidentels d'intoxication à l' H_2S ont été reportés du fait d'une mauvaise ventilation de certaines habitations chauffées à la vapeur géothermique et de fuites sur le réseau de chaleur ;
- en 2008, à Hengill (Islande), un ouvrier travaillant à l'extérieur d'une centrale géothermique, mais sous le vent d'une cheminée de ventilation de gaz, a été intoxiqué par de l' H_2S qui en provenait ;
- en 2008 à Kawareau (Nouvelle-Zélande), un panache de gaz renfermant du H_2S , émis en sortie

d'un silencieux haute pression, a intoxiqué des ouvriers à deux reprises en quelques jours ;

/ un dégagement de H_2S néoformé suite à une réaction chimique avec un autre produit lors d'opérations de maintenance :

- en 1993, à Puna (Hawaï, États-Unis) l'utilisation inadéquate de NaOH pour le nettoyage d'un silencieux sur le puits KS-9 a provoqué une réaction chimique avec émission de H_2S ;
- en 2018 à Montesson (France), le nettoyage d'une tuyauterie avec de l'acide chlorhydrique a provoqué une émission de H_2S dans une salle souterraine d'accès à un puits géothermique ;
- en 2020 en Île-de-France (France), lors du nettoyage d'une tête de puits géothermique à l'acide sulfamique, de l' H_2S a été émis dans un local souterrain.

Note : dans les deux derniers accidents survenus en France, l'enquête est encore en cours et aucune autre information n'a pu être collectée.

Conséquences

Sur les 25 événements où des victimes ont été signalées, on relève 8 cas d'intoxications mortelles totalisant 18 morts et 23 autres cas totalisant plus de 100 blessés. Dans ce décompte, deux cas survenus sur deux sites indonésiens (gérés par des sociétés chinoises) représentent à eux seuls deux tiers des blessés et un tiers des morts : ils résultent à chaque fois de la propagation d'un panache de vapeur géothermale à forte teneur en H_2S vers des personnes situés à plusieurs centaines de mètres de distance, du fait de conditions météorologiques (vent faible) et topographiques (cuvette) particulières, alliées à de probables défauts de fonctionnement des systèmes de monitoring ou de sécurité.

En outre, des dizaines voire des centaines de personnes ont généralement dû être confinées chez elles ou évacuées par mesure de sécurité lors des événements recensés⁵. Nombre d'entre elles se sont ensuite plaintes de nuisances olfactives voire de symptômes légers (maux de tête, nausée, vertiges...).

On notera enfin que 88 % des cas mortels se sont produits en phase d'exploitation, aussi bien de centrales de production de chaleur que d'électricité, et seulement 12 % en phase de foration du site géothermique. Au cours de la dernière décennie, ces accidents mortels par intoxication à l' H_2S sont survenus en Indonésie et en France où ils ont essentiellement concerné des opérateurs intervenant lors de travaux de maintenance ou d'entretien.

⁵ dont 70 personnes évacuées en France à Sucy-en-Brie en 2017.

Mesures de maîtrise des risques

A Rotorua (Nouvelle-Zélande), après des décès survenus en 1962 du fait d'émissions de H_2S dans une ville chauffée par géothermie, une nouvelle réglementation a été mise en oeuvre concernant l'utilisation domestique des ressources géothermiques, assortie d'une sensibilisation accrue du public aux dangers encourus. De ce fait, plus aucun décès attribuable à ce gaz n'a été signalé après 1962.

A Puna (Hawaï, Etats-Unis) en 1991, les recommandations émises suite à une importante éruption de puits (blow-out) ont été de quatre types :

/ améliorer le monitoring : si l'opérateur doit forer en dessous de 500 pieds (152 m) sans bloc obturateur de puits (BOP), il doit vérifier les températures maximales du fond du trou à chaque changement de tige, prélever des échantillons d'eau représentatifs et les faire analyser dès que possible pour surveiller les augmentations de salinité et de conductivité, prélever des échantillons de terrain tous les 3 m et vérifier la présence éventuelle de minéraux hydrothermaux ; en outre, dès qu'une zone géothermique peut être rencontrée, l'opérateur doit être prêt à mettre en place une protection appropriée contre les éruptions (tubage cimenté), et disposer d'un système de surveillance avec alarme ;

/ améliorer l'équipement : augmenter le débit de la conduite de dérivation du BOP, inclure un obturateur double supplémentaire, installer un silencieux d'échappement à l'extrémité de cette conduite, disposer de pompes à boues d'un débit plus important, ainsi que d'une alimentation en eau froide et d'un refroidisseur de boue suffisants⁶ ;

/ améliorer la supervision : en rendant obligatoire la présence du personnel de supervision sur la machine pendant le forage et surtout pendant les changements d'équipe pour s'assurer que la nouvelle équipe est bien informée de toute instruction spéciale ; de plus, tout le personnel devrait être formé à l'utilisation des équipements de surveillance recommandés ;

/ améliorer la réglementation, afin de mieux impliquer l'administration dans le suivi des projets.

A Hengill (Islande) en 2007, après avoir remplacé les valves défectueuses à l'origine de la fuite de H_2S , le design du circuit d'évacuation du gaz a été revu et des respirateurs à air comprimé ont été installés aux endroits critiques.

En France, l'INRS a émis en 2014 des préconisations⁷ concernant les mesures de prévention et de protection qui s'imposent lors de toute opération au cours de laquelle « le sulfure d'hydrogène peut apparaître de manière inattendue, en particulier lors des interventions en espace confiné ». Il s'agit de :

/ la présence de deux travailleurs au moins sur le lieu de travail ;

/ le maintien, à proximité immédiate, d'un appareil de protection respiratoire pour chaque opérateur ;

/ l'utilisation d'un système de détection du gaz.

En outre, il est recommandé d'appliquer les mesures préconisées pour la manipulation de l' H_2S en atelier ou en zone de stockage, à savoir :

/ instruire le personnel des risques présentés par ce gaz, des précautions à observer et des mesures à prendre en cas d'accident ;

/ contrôler en continu la teneur de l'atmosphère en H_2S afin de pouvoir donner l'alarme dès que la concentration dépasse le seuil compatible avec la sécurité du personnel ;

/ ne jamais procéder à des travaux dans un endroit susceptible de contenir de l' H_2S sans appliquer strictement les précautions d'usage⁸ ;

/ éventuellement, prévoir des appareils de protection respiratoire autonomes isolants pour certains travaux de courte durée, à caractère exceptionnel et pour les interventions d'urgence.

Conclusion

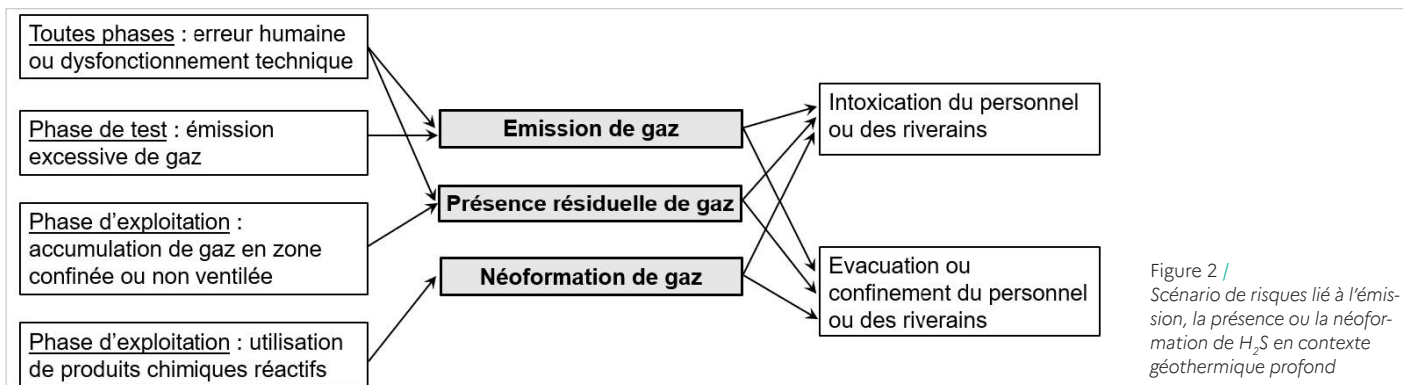
L'analyse des 32 cas d'émission accidentelle de H_2S en contexte géothermique montre que c'est principalement la phase d'exploitation des gîtes géothermiques qui est la plus propice à ces phénomènes, du fait de l'existence de zones confinées où peut stagner une atmosphère viciée au sein des bâtiments d'exploitation. Plusieurs cas mentionnent le fait que, bien qu'équipé de détecteurs de gaz, du personnel a tout de même été intoxiqué à cause de l'impact foudroyant de ce gaz sur les centres nerveux respiratoires.

Ainsi, les centrales de production de chaleur géothermique apparaissent autant, voire plus, impactées que celles de production d'énergie électrique qui reposent pourtant sur des puits généralement plus profonds et des fluides géothermaux plus chargés en gaz dissous. L'une des raisons de ce constat est probablement le fait qu'il existe environ 1100 sites de production de chaleur géothermique dans le monde contre environ 600 sites de production d'électricité géothermique (Gombert et al., 2017) : cela est encore plus net en France qui exploite 52 gîtes géothermiques de production de chaleur contre seulement 2 de production d'électricité.

⁶ Pour rappel, on se trouve ici en contexte volcanique actif, sur le flanc du volcan Kilauea.

⁷ https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_32§ion=recommandations

⁸ Cuves et réservoirs. Recommandation CNAMTS R 435. Paris : INRS ; 2008.



Les causes de ces émissions de gaz sont multiples (Figure 2) : émissions de H₂S accumulé dans des installations géothermiques à l'occasion de leur purge ou de leur maintenance, dysfonctionnements des systèmes de sécurité, proximité d'ouvriers par rapport à un point connu d'émission de H₂S, propagation à une distance inattendue d'un panache gazeux, dégagement de H₂S néoformé suite à une réaction chimique avec un autre produit, etc.

Dans le contexte de la géothermie profonde, ce travail montre que le risque d'intoxication lié aux émissions d'H₂S est de loin le plus impactant sur la vie humaine, ainsi probablement que sur l'environnement bien que ce dernier point ne soit presque jamais mentionné. Alors qu'à ce jour aucun décès ne semble imputable aux nombreux séismes induits par les activités géothermiques, on dénombre en effet 18 morts liés aux émissions d'H₂S, dont 13 depuis le début du 21^e siècle, et ce, malgré les progrès réalisés en matière de sécurité industrielle et notamment de détection de ce gaz. En outre, dans les régions où la filière géothermique est en fort développement, il convient de prendre également en compte dans l'acceptabilité sociale de cette filière les autres nuisances induites par ce gaz (odeurs désagréables et symptômes sanitaires légers de type maux de tête ou nausées), principalement en contexte volcanique.

Bien qu'étant une première ébauche, cette base de données est toutefois quasiment exhaustive à ce jour, en ce qui concerne les données disponibles sur Internet et dans les bases d'articles scientifiques. Il semble difficile de parvenir à l'amender significativement tant que l'information manquera en ce qui concerne un certain nombre de grands pays producteurs d'énergie géothermique, comme la Chine ou la Turquie.

Références bibliographiques

- / Arnorsson S, Stefansson A, Bjarnason JÖ, 2007. Fluid-Fluid Interactions in Geothermal Systems. Reviews in Mineralogy & Geochemistry – Rev. Mineral. Geochem. 65: 259-312, 10.2138/rmg.2007.65.9.
- / Danielsson F, Fendler R, Hailwood M, Shrivs J, 2009. Analysis of H₂S – incidents in geothermal and other industries. Preliminary analysis of data. OECD WGCA Steering Group of Analysis of H₂S Incidents, September 4th 2009, 52 p.

- / Fridriksson T, 2016. Gases in Geothermal Fluids and Gas Emissions from Geothermal Power Plants. Global Geothermal Roundtable III: Reykjavík, April 26, 2016, 16 p.
- / Gombert P, Lahaie F, Cherkaoui A, 2017. Etat des connaissances sur les risques, impacts et nuisances potentiels liés à la géothermie profonde. Rapport d'étude Ineris DRS-16-157477-00515A.
- / Kage S, Ito S, Kishida T, Kudo K, Ikeda N, 1998. A fatal case of hydrogen sulfide poisoning in a geothermal power plant. J Forensic Sci. 1998 Jul; 43(4): 908-910.
- / Kristmannsdottir H, Armannsson H, 2003. Environmental aspects of geothermal energy utilization. Geothermics 32 (2003): 451-461.
- / Thomas R, Whiting D, Moore J, Milner D, 1991. Independent Technical Investigation of the Puna Geothermal Venture Unplanned Steam Release, June 12 and 13, 1991. Document 888452, 42 p.
- / Tissot S, Pichard A, 2000. Seuils de Toxicité Aiguë - Hydrogène Sulfuré (H₂S). Rapport INERIS-DRC-00-25425-ETSC- STi - 00DR294_version1.doc, 37 p.
- / Ware P, Hochwimmer A, 2010. Health and Safety Aspects of the Kawerau Project, Mighty River Power. Proceedings World Geothermal Congress 2010 Bali, Indonesia, 25-29 April 2010, 9 p.
- / WHO, 1981. IPCS INTERNATIONAL PROGRAMME ON CHEMICAL SAFETY. ENVIRONMENTAL HEALTH CRITERIA 19. Hydrogen Sulfide World Health Organization, Geneva, 1981, ISBN 92 4 154079 6, <https://incchem.org/documents/ehc/ehc/ehc019.htm>.

Annexes

- / Annexe 1. Base de données d'accidents et d'incidents liés à l'H₂S en contexte géothermique profond ;
- / Annexe 2. Présentation des cas les plus intéressants sous forme de fiches.

Annexes

/ Annexe 1. Base de données d'accidents et d'incidents liés à l'H₂S en contexte géothermique profond ;

/ Annexe 2. Présentation des cas les plus intéressants sous forme de fiches.

Annexe 1. Base de données d'accidents et d'incidents liés à l'H2S en contexte géothermique profond

Légende : FOR = Foration, TEST = Test, EXP = Exploitation,

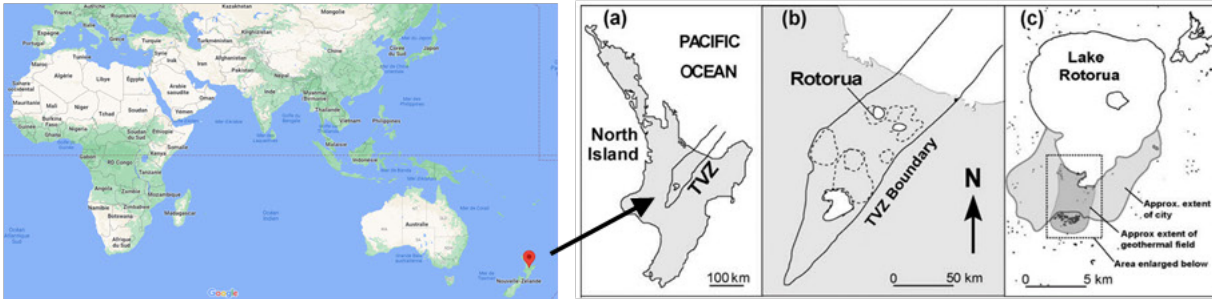
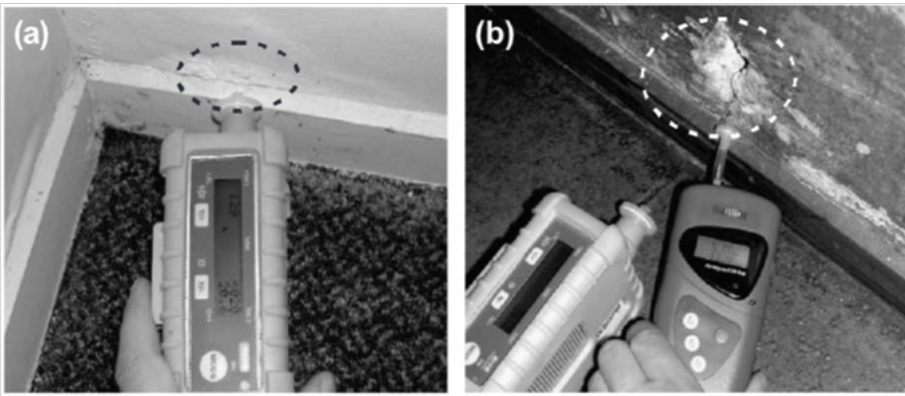
Réf.	Pays	Région	Site	Type	Date	Morts	Blessés	Autres dommages	Phase	Description	Analyse	Référence bibliographique
1962-NZL	Nouvelle-Zélande	Rotorua	-	Chaleur géothermique	1962	3	?	Plaintes pour mauvaises odeurs, nausées, maux de tête, vomissements, pertes d'appétit et troubles du sommeil	EXP	Dans les zones géothermiques de Rotorua, le chauffage des maisons, des bâtiments et des piscines, ainsi que l'eau chaude sanitaire et la vapeur pour la cuisson dans une ville de 40 000 habitants provient d'environ 500 forages actifs.	Des cas accidentels d'intoxication aiguë au sulfure d'hydrogène, associés à une mauvaise ventilation des habitations chauffées à la vapeur géothermique, ont été occasionnellement signalés, dont au moins 3 décès en 1962. Cependant, avec l'introduction d'exigences légales concernant l'utilisation domestique des ressources géothermiques, et peut-être aussi en raison d'une sensibilisation accrue du public aux dangers encourus, aucun décès attribuable au sulfure d'hydrogène n'a été signalé à Rotorua depuis 1962.	WHO, 1981. IPCS INTERNATIONAL PROGRAMME ON CHEMICAL SAFETY. ENVIRONMENTAL HEALTH CRITERIA 19. Hydrogen Sulfide. World Health Organization, Geneva, 1981. ISBN 92 4 154079 6. https://inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc019.htm
1976-USA	Etats-Unis	Californie	The Geysers	Centrale électrique	1976	0	?	-	EXP	-	-	https://www.oostl.gov/servlets/jsp/15226737
1991a-USA	Etats-Unis	Hawaï	Puna	-	12/06/1991	0	1	Evacuation de 75 personnes	FOR	Le puits géothermique de Puna Geothermal Venture est entré en éruption, émettant de la vapeur sulfureuse blanche pendant plus de 30 h avant qu'on ne parvienne à colmater la fuite. L'accident s'est produit dans la région rurale de Pohoiki. Le bruit de ce blow-out a atteint jusqu'à 90 décibels et ressemblait, selon les témoins, à celui d'un avion à réaction au décollage, sauf qu'il n'a pas faibli pendant deux nuits et un jour. Ce bruit et l'odeur du sulfure d'hydrogène ont provoqué l'évacuation de 75 personnes de leur domicile.	Le chef de projet a déclaré que la foreuse avait touché une zone de vapeur à haute pression extrêmement chaude bien plus tôt que prévu mais que l'éruption n'était pas grave puisqu'elle avait pu être maîtrisée. Le ministère de la Santé de l'état et le comté ont ordonné à l'entreprise d'arrêter le forage pendant l'enquête sur l'incident.	https://www.latimes.com/archives/la-xpm-1991-06-16-mn-503-story.html
1991b-USA	Etats-Unis	Hawaï	Puna PGV (puits KS-7)	-	21/02/1991	0	1	Evacuation des riverains	FOR	Il s'est produit un blow-out qui a blessé un ouvrier au puits KS-7, foré à travers une zone intensément minéralisée et qui a connu des retours de boue mineurs pendant les changements de tiges.	Le foreur a rapidement fermé le bloc obturateur de puits (BOP) et évacué le fluide par un divergent de 3 pouces, avant de fermer ce dernier divergent afin de sécuriser le puits. Au moment de l'incident, un « preventer annulaire », qui était fixé à un tubage de 13-3/8 pouces cimenté, servait d'unique BOP. Le puits a ensuite été bouché et suspendu. Il n'était pas prévu qu'une éruption de puits (blow-out) se produise à cette profondeur relativement faible (vers 511 m).	https://archive.epa.gov/region9/waste/archive/web/pdf/emerfinal.pdf
1992a-USA	Etats-Unis	Hawaï	Puna PGV (puits KS-8)	-	12/08/1992	0	0	Riverains inquiets à cause de l'odeur	FOR	Deux rejets gazeux ont eu lieu à PGV pendant le forage des puits, les essais et le démarrage de l'usine. Ils ont déclenché des alertes les 12 et 17 août 1991. D'autres rejets ont également eu lieu (voir lignes suivantes).	Bien que la plupart de ces rejets de H ₂ S aient été faibles et inférieurs à la concentration à déclarer de 25 ppb, les concentrations ont été mesurables et se sont produites tout au long des années depuis 1991. Les voisins de l'installation ont mesuré ou détecté certains rejets de H ₂ S et les journaux locaux en ont signalé d'autres.	https://archive.epa.gov/region9/waste/archive/web/pdf/emerfinal.pdf
1992b-USA	Etats-Unis	Hawaï	Puna PGV (puits KS-8)	-	22/10/1992	0	0	Riverains inquiets à cause de l'odeur	FOR	Un nouveau rejet gazeux a eu lieu à PGV pendant le forage des puits, les essais et le démarrage de l'usine. Il a déclenché une alerte le 22 octobre 1991.	Bien que la plupart de ces rejets de H ₂ S aient été faibles et inférieurs à la teneur à déclarer de 25 ppb, des teneurs mesurables se sont produites chaque année depuis 1991. Les voisins de l'installation ont mesuré ou détecté	https://archive.epa.gov/region9/waste/archive/web/pdf/emerfinal.pdf

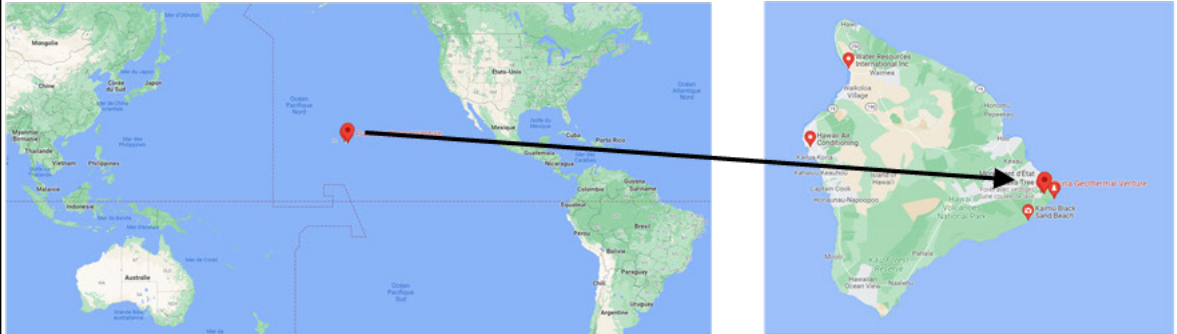
											certain rejets de H ₂ S et les journaux locaux en ont signalé d'autres.	
1993a-USA	Etats-Unis	Hawaï	PGV	-	janv.-1993	0	1	-	FOR	Un accident survenu en janvier 1993, impliquant du H ₂ S, a conduit à l'hospitalisation d'un travailleur.	-	https://scholarworks.umt.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=9293&context=etd
1993b-USA	Etats-Unis	Hawaï	Puna PGV (puits KS-9)	-	08/02/1993	0	7	Des habitants des environs ont été malades à cause des fumées entrées dans leurs maisons.	EXP	Des émissions excessives de H ₂ S ont été produites par le silencieux cyclonique (cyclonic muffler) sur une période de deux à quatre minutes. La Station SE a mesuré 23 ppb en moyenne horaire et le pic a atteint 250 000 ppb sur le site et 600 ppb à l'extérieur. Deux ouvriers et cinq policiers ont été intoxiqués.	Ces émissions ont été provoquées par un mélange inadéquat avec du NaOH dans la ligne d'écoulement lors d'une opération de nettoyage d'une durée de trente minutes.	https://archive.epa.gov/region9/waste/archive/web/pdf/emerfinal.pdf https://scholarworks.umt.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=9293&context=etd
1993c-USA	Etats-Unis	Hawaï	PGV	-	14/05/1993	?	?	?	-	Une fuite de H ₂ S a été détectée le 14 mai.	Cette fuite a provoqué une déclaration d'urgence aux autorités locales.	https://scholarworks.umt.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=9293&context=etd
1993d-USA	Etats-Unis	Hawaï	PGV	-	09/11/1993	?	?	?	-	Une fuite de H ₂ S a été détectée le 9 novembre.	Cette fuite a provoqué une déclaration d'urgence aux autorités locales.	https://scholarworks.umt.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=9293&context=etd
1995-JPN	Japon	Kakkonda	Puits WD-1	-	juil.-1995	0	0	Abandon et rebouchage du forage	FOR	Le forage d'exploration WD-1A dans le champ géothermique de Kakkonda, débuté en janvier 1994, était prévu pour atteindre une profondeur de 4000 m. Cependant, à environ 3450 m, des problèmes de détérioration des propriétés de la boue de forage sont apparus. En outre, des teneurs élevées en CO ₂ et H ₂ S ont été enregistrées dans les retours de boue de forage en juillet 1995. Ce fluide a dégazé, provoquant des émissions de H ₂ S.	Cette détérioration des propriétés de la boue de forage était dû principalement à l'augmentation rapide du gradient de température. Pour la contraindre, il aurait fallu utiliser une boue de plus haute densité afin notamment de contrôler ces gaz noyés, mais les températures élevées (environ 500 °C) ont empêché l'utilisation de ce type de boue. Les opérations ont dû être interrompues à 3729 m de profondeur, pour des raisons de sécurité. Un programme complet de diagrapie a été réalisé, après quoi le puits a été bouché à 2400 m en août 1995 (Saito et al. 1998).	https://geothermal-energy-journal.springeropen.com/tracks/pdf/10.1186/s40517-018-0113-4.pdf Saito S, Sakuma S, Uchida T. 1998. Drilling procedures, techniques and test results for a 3.7 km deep, 500°C exploration well, Kakkonda, Japan. Geothermics Vol.27 No 5/6: 573-590.
1996-USA	Etats-Unis	Hawaï	Puna PGV (Brine Brooster)	-	03/10/1996	0	0		FOR	Emission de vapeur renfermant de l'H ₂ S. La station de surveillance A a enregistré une émission de 302 ppb et une moyenne horaire de 47 ppb.	L'incident s'est produit en raison d'un dysfonctionnement de la vanne de contrôle du niveau du séparateur, causant une perte de lubrifiant dans la garniture mécanique de la pompe du surpresseur de saumure. Cela a entraîné un déversement par inadvertance d'injectat et de vapeur renfermant de l'H ₂ S. Deux urgences ont été déclarées aux autorités les 3 et 4 octobre.	https://archive.epa.gov/region9/waste/archive/web/pdf/emerfinal.pdf
1997a-USA	Etats-Unis	Hawaï	PGV	-	16/06/1997	?	?	?	-	Des fuites de H ₂ S ont été détectées les 16 et 17 juin.	Ces fuites ont provoqué des déclarations d'urgence aux autorités locales.	https://scholarworks.umt.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=9293&context=etd
1997b-USA	Etats-Unis	Hawaï	PGV	-	31/10/1997	?	?	?	-	Une fuite de H ₂ S a été détectée le 31 octobre.	Cette fuite a provoqué une déclaration d'urgence aux autorités locales.	https://scholarworks.umt.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=9293&context=etd
1998-JPN	Japon	-	-	-	1998	1	0	-	EXP	Un ouvrier est entré dans une salle de séparation d'huile pour retirer l'huile usagée d'une pompe à vide dans une centrale géothermique. Il s'est soudainement effondré et est décédé peu après.	Comme du sulfure d'hydrogène gazeux a été détecté dans l'atmosphère sur le lieu de l'accident, un empoisonnement par ce gaz a été suspecté et une analyse toxicologique du sulfure et du thiosulfate dans le sang, le cerveau, les poumons et le muscle fémoral a été effectuée. Les concentrations de sulfure dans ces tissus étaient similaires à celles précédemment rapportées pour des cas mortels de gaz sulfureux d'hydrogène. La concentration de thiosulfate dans le sang était au moins 48 fois plus élevée que celle des échantillons de contrôle. Sur la base de ces résultats, la cause du décès a été attribuée à une intoxication au sulfure d'hydrogène.	Kage et al. (1998)

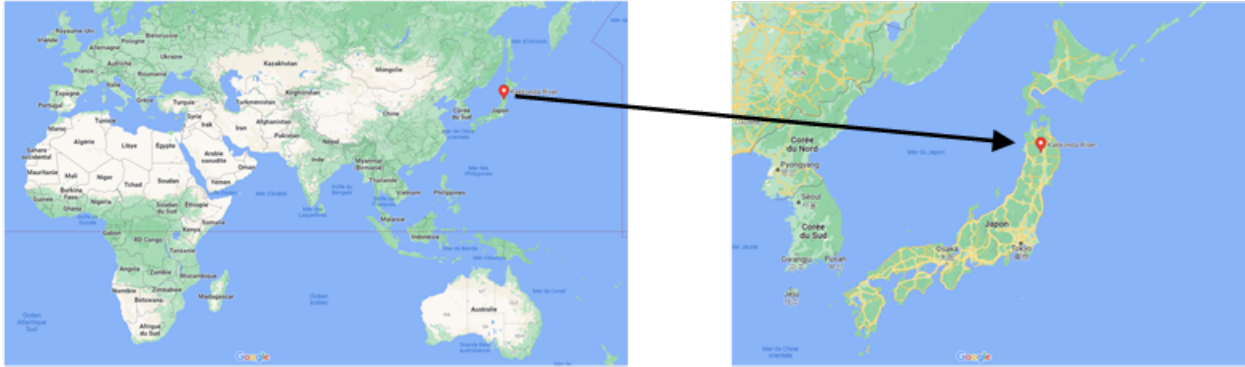
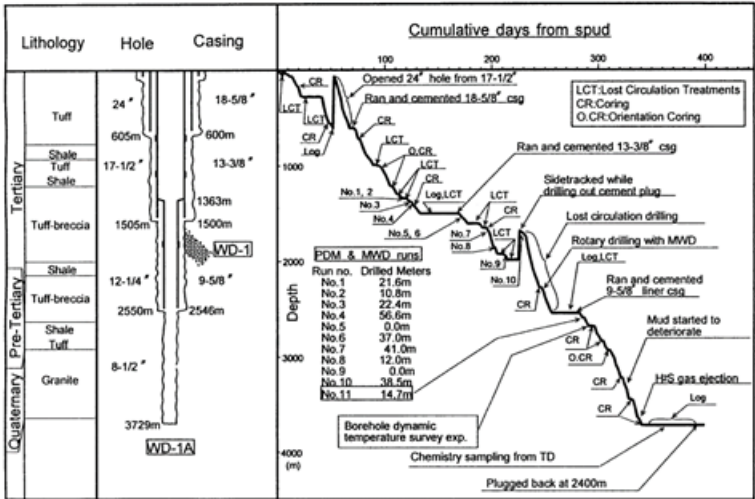
1999a -USA	Etats-Unis	Hawai	PGV	-	26/04/ 1999	?	?	?	-	Une fuite de H ₂ S a été détectée le 25 avril.	Cette fuite a provoqué une déclaration d'urgence aux autorités locales.	https://scholarworks.umt.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=9293&context=etd
1999b -USA	Etats-Unis	Hawai	PGV	-	30/08/ 1999	?	?	?	-	Une fuite de H ₂ S a été détectée le 30 août.	Cette fuite a provoqué une déclaration d'urgence aux autorités locales.	https://scholarworks.umt.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=9293&context=etd
2007- -ISL	Islande	Hengill	Hellisheiði Power Station	Centrale mixte	17/09/ 2007	0	3	Evacuation du hall des turbines	EXP	Au cours d'un programme de redémarrage de la centrale, du gaz chargé de H ₂ S s'est échappé dans le hall des machines où travaillaient les opérateurs et le personnel de l'entreprise.	La pression s'est accumulée dans les collecteurs de condensat et les vannes de décharge se sont ouvertes. Le gaz qui s'est échappé était resté dans les condenseurs lorsque la vapeur s'est condensée après l'arrêt de la centrale. Le hall des turbines a dû être fermé et du personnel en scaphandre est intervenu pour fermer les vannes. Trois travailleurs ont été gravement intoxiqués : l'un a perdu connaissance mais a rapidement repris ses esprits, les autres ont présenté des symptômes d'empoisonnement plus légers. Les examens médicaux n'ont révélé aucun effet durable sur la santé et les hommes ont repris le travail le lendemain. Après ces incidents, les valves défectueuses ont été remplacées, les voies d'évacuation ont été redessinées et des respirateurs à air comprimé installés aux endroits critiques.	Danielsson et al. (2009)
2008a -ISL	Islande	Hengill	Hellisheiði Power Station	Centrale mixte	20/08/ 2008	0	1	-	EXP	Un travailleur exerçant à l'extérieur du bâtiment d'une centrale géothermique mais dans le sens du vent a été exposé à de l'H ₂ S provenant d'une cheminée de ventilation de gaz située en amont.	L'ouvrier a été pris d'un malaise avec des rougeurs au visage puis, sur le chemin de l'hôpital, il a eu des nausées et a vomit du sang. Il s'est complètement rétabli en peu de temps. La cause a été jugée par les médecins comme résultant de concentrations probablement assez faibles de H ₂ S.	Danielsson et al. (2009)
2008b -ISL	Islande	Hengill	Hellisheiði Power Station	Centrale mixte	10/12/ 2008	2	0	-	EXP	Deux travailleurs sont morts dans une nouvelle centrale géothermique en Islande. Ils sont entrés dans le réservoir d'un évaporateur de vapeur juste après avoir découpé un trou d'homme sur son côté.	Le rapport des médecins a déclaré que la mort avait été causée par un manque d'oxygène mais a impliqué d'autres gaz, dont le H ₂ S, comme cause contributive. Une étude du gaz qui a pénétré dans le réservoir et qui a formé cette atmosphère mortelle a indiqué que l'H ₂ S avait probablement remplacé une partie importante de l'oxygène atmosphérique présent après l'arrêt du réacteur plusieurs semaines avant l'accident. Il s'agissait d'un cas d'espace confiné ou semi-confiné avec de l'air stagnant et du H ₂ S ainsi que d'autres gaz géothermiques dans un équipement qui était en attente de modification. L'entrée par trou d'homme avait été interdite. Les décès sont survenus très soudainement dès que les ouvriers ont pénétré par le trou d'homme.	Danielsson et al. (2009)
2008- -NZL	Nouvelle-Zélande	Île Nord	Kawerau	Centrale électrique	24/04/ 2008	0	4	Evacuation du site	EXP	Deux ouvriers ont été intoxiqués par un panache de gaz alors qu'ils travaillaient à quelques mètres de l'évent d'un silencieux haute pression. Les deux ouvriers ont perdu connaissance et ont été traités sur place puis emmenés à l'hôpital. Quatre jours plus tard, un deuxième incident identique a intoxiqué deux nouveaux ouvriers et a entraîné une évacuation d'urgence de tout le site.	Les deux incidents ont entraîné l'évacuation du site. Lors du second incident, un opérateur spécialisé surveillait pourtant la zone de séparation de la vapeur avec un détecteur de gaz. Aucun niveau élevé de H ₂ S n'a été détecté par l'opérateur ni par aucun détecteur du site. Pendant l'évacuation, les pompiers ont parcouru le site et ont déclaré qu'il n'y avait pas de teneur élevée. Les deux ouvriers concernés par ce second incident ont ensuite été diagnostiqués par le personnel médical comme sensibles à l'exposition à de petites	Ware et Hochwimmer (2010)

2014- -PHL	Philippines	Biliran Island	BGI	-	24/06/ 2014	0	8	-	TEST	Huit ouvriers du Biliran Geothermal Incorporated (BGI) ont été intoxiqués par un dégagement brutal de gaz renfermant de l'H ₂ S en phase de test d'un forage géothermique.	quantités de H ₂ S à la suite de ce premier incident.	https://www.biliranisland.com/blogs/2014/06/22/at-biliran-geothermal-project-eight-workers-hurt-in-gas-poisoning/
2014- -USA	Etats-Unis	Hawai	Puna GV Pohoiki	-	07/08/ 2014	0	0	Confinement ou évacuation des riverains	EXP	Un dégagement incontrôlé de H ₂ S est survenu dans l'usine de production géothermique de Puna Geothermal Venture à Pohoiki.	Le rejet gazeux signalé a pu être contenu puis sécurisé. Les responsables de la défense civile du comté d'Hawaii ont recommandé à tous les résidents ressentant un malaise d'évacuer la zone. Les habitants de Leilani Estates, Pohoiki et Lani Puna ont été invités à rester à l'intérieur pour éviter toute exposition. D'autres résidents ont été évacués mais ils ont ensuite pu rentrer chez eux. Les émissions de H ₂ S se sont ensuite dissipées et tout est rentré dans l'ordre.	https://bigislandnow.com/2014/08/07/uncontrolled-hydrogen-sulfide-release-at-puna-geothermal/ https://hawaii247.com/2014/08/07/uncontrolled-venting-of-hydrogen-sulfide-gas-at-puna-geothermal-venture/
2017- -FRA	France	Île-de-France	Sucy-en-Brie	Chaleur géothermique	13/09/ 2017	0	0	Evacuation de 70 personnes	EXP	Un dégagement de vapeur d'eau contenant de l'H ₂ S s'est produit dans une salle inondée d'une centrale géothermique.	À leur arrivée, les pompiers ont détecté une teneur de 20 ppm vol. dans l'air. Ils ont évacués les riverains et coupé l'électricité. L'exploitant a pompé l'eau. Le diagnostic a conclu que « suite à la remontée inhabituelle de dépôts par la ligne de production géothermale, une brutale montée en pression dans la centrale a généré l'ouverture d'une soupape de sécurité ». On ne sait pas d'où viennent ces dépôts mais leur présence dans l'eau « a empêché la soupape de se refermer, générant une accumulation rapide d'eau géothermale à 75 °C dans la centrale géothermique qui a servi de rétention ». Finalement « de la vapeur d'eau s'est donc échappée par les ventilations, emmenant une partie des gaz présents naturellement dans la source géothermale et notamment du H ₂ S, dangereux à forte concentration dans des espaces fermés et non aérés ».	https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/50375/ https://www.legiparisien.fr/val-de-marne-94/sucy-en-brie-94370/sucy-des-matieres-solides-inhabituelles-a-l-origine-du-probleme-de-geothermie-24-09-2017-7283556.php
2018- -FRA	France	Île-de-France	Montesson	Chaleur géothermique	17/09/ 2018	2	0	-	EXP	Lors du nettoyage d'un conduit avec de l'acide chlorhydrique, deux ouvriers décédèrent asphyxiés dans l'accès à un puits géothermique.	La formation de H ₂ S au cours de l'opération est suspectée. Les enquêteurs ont constaté que les deux hommes disposaient d'équipement de protection mais ils ont déclaré que « même s'ils avaient des masques, la concentration était tellement importante, qu'ils seraient quand même morts ». L'enquête en cours doit déterminer si l'équipement de protection a été utilisé correctement ou si ces deux hommes ont été confrontés à une situation hors normes créant un piège fatal et inévitable.	https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/54217/ https://www.legiparisien.fr/yvelines-78/yvelines-deux-ouvriers-meurent-asphyxies-sur-un-chantier-a-montesson-18-09-2018-7892965.php
2020- -FRA	France	Île-de-France	?	Chaleur géothermique	16/04/ 2020	1	0	-	EXP	Une entreprise menait une opération de maintenance avec nettoyage d'une tête de puits géothermique à l'acide sulfamique, dans un local souterrain. A la fin du nettoyage, l'un des opérateurs a fait un arrêt cardiaque et n'a pu être réanimé.	Il semblerait que l'acide sulfamique puisse réagir avec certains résidus pour former du H ₂ S, gaz qui a effectivement été retrouvé par les pompiers à leur arrivée. L'enquête est cependant encore en cours pour déterminer les causes exactes de la présence de ce gaz.	Informations confidentielles (enquête en cours)

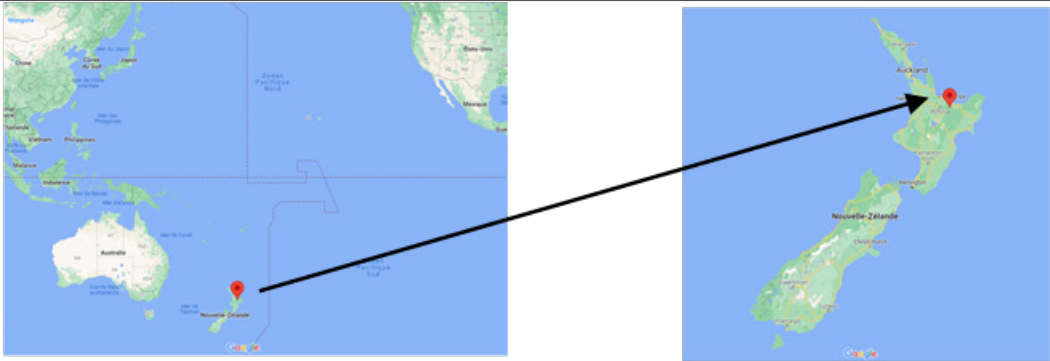
										Son collègue a prévenu les pompiers sans descendre à son tour.		
2020-NZL	Nouvelle-Zélande	?	?	Chaleur géothermique	août-2020	0	>1	-	EXP	Une équipe de travailleurs effectuant des opérations de maintenance dans une installation de séchage du bois par chaleur géothermique a été prise de maux de tête, de diarrhées et de vomissements. On pense qu'elle a été exposée à de l'H ₂ S lorsqu'elle a pénétré dans la tuyauterie d'approvisionnement en chaleur.	L'installation est alimentée en eau géothermique dont on extrait la chaleur pour sécher le bois mais un puits géothermique inactif est également situé sur le site et on pense qu'il est à l'origine du H ₂ S émis. Dans le cadre d'un précédent processus, une canalisation de purge du puits inactif était connectée directement à la conduite de décharge de l'installation de séchage, en amont du silencieux de décharge, afin de diriger les gaz du puits vers l'évent. Comme cette conduite de purge du puits n'a pas été isolée dans le cadre des récents travaux de maintenance, le gaz issu du puits inactif a pu remonter dans la conduite de décharge de l'usine jusqu'à l'endroit où les ouvriers de maintenance avaient retiré la tuyauterie.	https://www.worksafe.govt.nz/dmsdocument/146713-major-hazard-facilitiespetroleum-and-geothermal-annual-report-2020-21/latest
2021-IDN	Indonésie	Flores Island	Sorik Marapi	Centrale électrique	25/01/2021	5	46	Fermeture temporaire du puits incriminé	EXP	Après avoir réalisé les préparatifs pour l'ouverture du puits SMP-T02 du site de Sorik Marapi Unit II Geothermal Power, l'équipe de test a constaté une émission de gaz par l'évent du silencieux. Pendant trois minutes, un panache de gaz a été émis et s'est déplacé horizontalement vers les zones de rizières et de champs alentour. Puis de la vapeur géothermique est arrivée, sortant verticalement et purgeant le silencieux. Cette manœuvre dite de « décharge de puits » est classique en phase d'exploitation d'une centrale géothermique.	Au moment de l'accident, des villageois se trouvaient dans les rizières situées à environ 300-500 m de l'emplacement du puits géothermique. Cette fuite d'hydrogène sulfuré a intoxiqué 46 personnes et entraîné la mort de 5 autres. Il n'a pas été précisé si des employés avaient été blessés. La société a admis qu'un certain nombre de ses détecteurs n'ont pas fonctionné pendant la fuite et elle a décidé de fermer temporairement le puits.	https://www.icaiglobal.com/news/kaishan-compressor-dives-after-five-die-in-toxic-gas-leak-at-indonesian-project
2022a-IDN	Indonésie	Central Java	GDE Dieng	Centrale électrique	12/03/2022	1	7	Evacuation de 15 employés	FOR	Un puits en cours de foration à la centrale géothermique Geo Dipa (PLTP) à Dieng, a libéré des gaz renfermant du H ₂ S lorsqu'un ouvrier a vérifié une soupape de sécurité sur une pompe à boue lors de la préparation du forage du puits numéro 28.	Toutes les procédures de sécurité standard étaient appliquées au moment de l'incident. Il semble s'agir du dysfonctionnement d'un équipement mais la cause exacte sera déterminée par l'enquête de l'inspecteur des énergies renouvelables du ministère de l'énergie et des ressources minérales.	https://www.upstreamonline.com/safety/fatal-incident-at-indonesiangeochemical-plant/231185978 https://voic.id/en/news/144637/geo-dipa-pltp-drilling-well-explosion-one-person-dies-from-inhaling-h2s-gas
2022b-IDN	Indonésie	Sibanggor Julu	PT SMGP Mandailing Natal	-	24/04/2022	0	21	Evacuation de la population	FOR	Deux puits en cours de foration appartenant à PT Sorik Merapi Geothermal Power ont émis de la boue chaude ainsi que du gaz renfermant de l'H ₂ S dans le village de Sibanggor Julu, district de Puncak Sorik Merapi.	Au total, 21 résidents ont dû être soignés à l'hôpital de Panyabungan en raison d'une intoxication au gaz H ₂ S. Les symptômes ressentis par les résidents sont presque les mêmes, à savoir des vertiges, des vomissements et des nausées.	https://tanahair.net/21-people-injured-after-hot-mud-surged-out-in-north-sumatra-geothermal-plant/
2022c-IDN	Indonésie	Sibanggor Julu	PT SMGP	-	mars-2022	0	52	-	?	Une fuite de gaz s'est produite sur un forage géothermique à PT SMGP.	Cette fuite a entraîné l'intoxication de 52 personnes parmi les ouvriers et la population des alentours.	https://ibcnews.my.id/2022/04/26/the-honor-of-gas-leaks-at-pt-smgmandailing-natal-hot-mud-to-poison-residents-boombasts-2/
XXXX-KEN	Kenya	?	?	?	?	3	0	-	EXP	-	-	Danielsson et al. (2009)

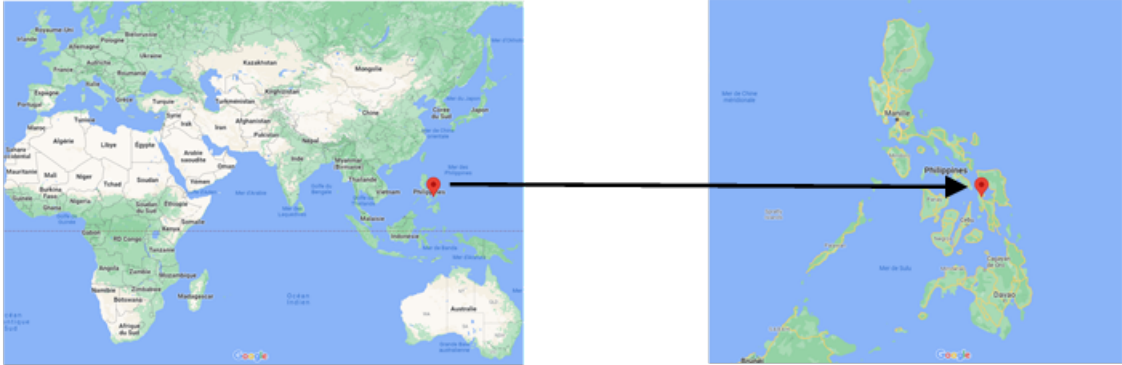
FICHE N° 1962-NZL		
LOCALISATION		
Pays :	Région :	Site :
Nouvelle-Zélande	Rotorua	-
Date :	Phase du projet :	Type de centrale :
1962	Exploitation	Chaleur géothermique
		
DESCRIPTION DE L'INCIDENT / ACCIDENT		
Dans les zones géothermiques de Rotorua, le chauffage des maisons, des bâtiments et des piscines, ainsi que l'eau chaude sanitaire et la vapeur pour la cuisson dans une ville de 40 000 habitants provient d'environ 500 forages actifs. Des cas accidentels d'intoxication aiguë au sulfure d'hydrogène, associés à une mauvaise ventilation des habitations chauffées à la vapeur géothermique, ont été occasionnellement signalés, dont au moins 3 décès en 1962. Cependant, avec l'introduction d'exigences légales concernant l'utilisation domestique des ressources géothermiques, et peut-être aussi en raison d'une sensibilisation accrue du public aux dangers encourus, aucun décès attribuable au sulfure d'hydrogène n'a été signalé à Rotorua depuis 1962.		
CONSEQUENCES		
Nombre de morts	Nombre de blessés	Autres dommages
3	?	Plaintes pour mauvaises odeurs, nausées, maux de tête, vomissements, pertes d'appétit et troubles du sommeil
PHOTO		
		
Quelques sites émissifs dans les bâtiments : (a) Event intérieur dans un mur extérieur (200 ppm de H₂S mais pas de teneur anormale en CO₂). (b) Event où l'on a enregistré une concentration de CO₂ allant jusqu'à 14 % et seulement 4,1 ppm de H₂S.		
REFERENCES		
WHO, 1981. IPCS INTERNATIONAL PROGRAMME ON CHEMICAL SAFETY. ENVIRONMENTAL HEALTH CRITERIA 19. Hydrogen Sulfide World Health Organization, Geneva, 1981, ISBN 92 4 154079 6, https://incchem.org/documents/ehc/ehc/ehc019.htm (consulté le 22/04/2022)		

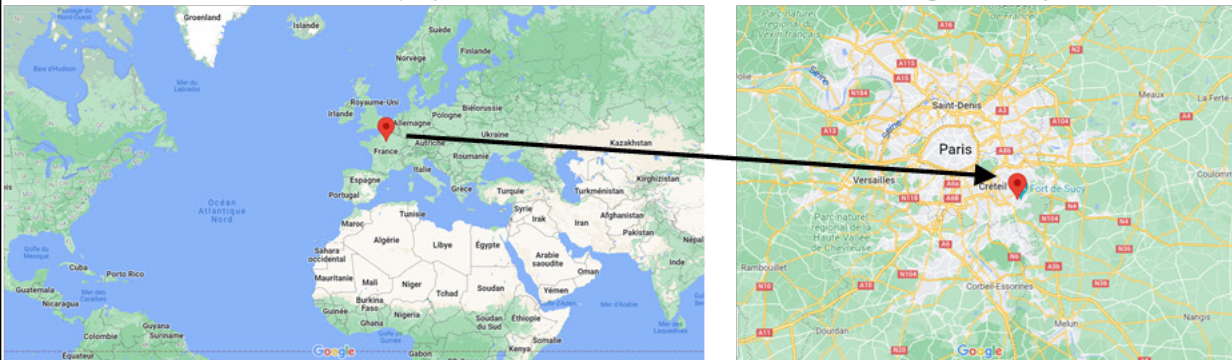
FICHE N° 1993b-USA		
LOCALISATION		
Pays :	Région :	Site :
Etats-Unis	Hawaï	Puna PGV (puits KS-9)
Date :	Phase du projet :	Type de centrale :
08/02/1993	Exploitation	-
		
DESCRIPTION DE L'INCIDENT / ACCIDENT		
Des émissions excessives de H₂S ont été produites par le silencieux cyclonique (cyclonic muffler) sur une période de deux à quatre minutes. La Station SE a mesurée 23 ppb en moyenne horaire et le pic a atteint 250 000 ppb sur le site et 600 ppb à l'extérieur. Deux ouvriers et cinq policiers ont été intoxiqués.		
ANALYSE DES CAUSES ET DES ACTIONS		
Ces émissions ont été provoquées par un mélange inadéquat avec du NaOH dans la ligne d'écoulement lors d'une opération de nettoyage d'une durée de trente minutes.		
CONSEQUENCES		
Nombre de morts	Nombre de blessés	Autres dommages
0	7	Des habitants des environs ont été malades à cause des fumées entrées dans leurs maisons.
PHOTO		
		
Vue du site de Puna Geothermal Venture à Hawaï (https://www.hawaiianelectric.com)		
REFERENCES		
https://archive.epa.gov/region9/waste/archive/web/pdf/emerfinal.pdf https://scholarworks.umd.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=9293&context=etd		

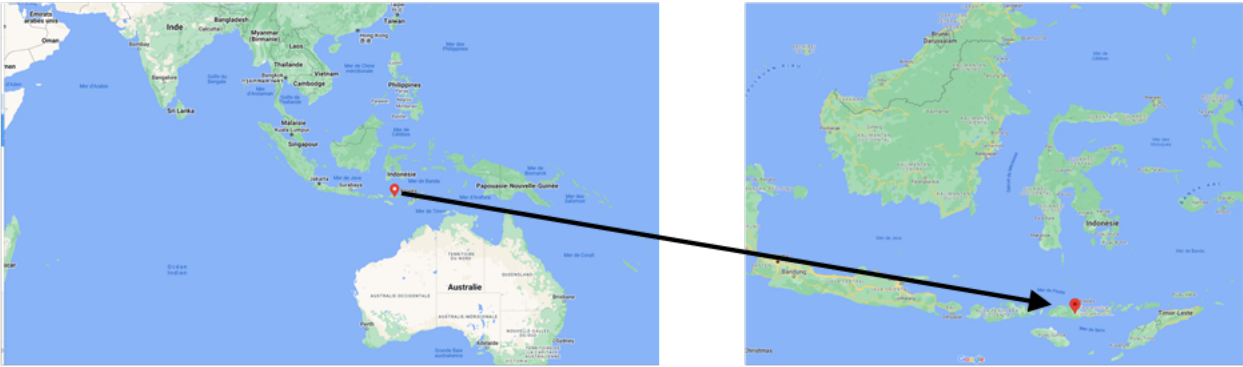
FICHE N° 1995-JPN		
LOCALISATION		
Pays :	Région :	Site :
Japon	Kakkonda	Puits WD-1
Date :	Phase du projet :	Type de centrale :
juil.-1995	Foration	-
		
DESCRIPTION DE L'INCIDENT / ACCIDENT		
Le forage d'exploration WD-1A dans le champ géothermique de Kakkonda, débuté en janvier 1994, était prévu pour atteindre une profondeur de 4000 m. Cependant, à environ 3450 m, des problèmes de détérioration des propriétés de la boue de forage sont apparus. En outre, des teneurs élevées en CO₂ et H₂S ont été enregistrées dans les retours de boue de forage en juillet 1995. Ce fluide a dégazé, provoquant des émissions de H₂S.		
ANALYSE DES CAUSES ET DES ACTIONS		
Cette détérioration des propriétés de la boue de forage était dû principalement à l'augmentation rapide du gradient de température. Pour la contrer, il aurait fallu utiliser une boue de plus haute densité afin notamment de contrôler ces gaz nocifs mais les températures élevées (environ 500 °C) ont empêché l'utilisation de ce type de boue. Les opérations ont dû être interrompues à 3729 m de profondeur, pour des raisons de sécurité. Un programme complet de diaggraphie a été réalisé, après quoi le puits a été bouché à 2400 m en août 1995 (Saito et al. 1998).		
CONSEQUENCES		
Nom bre de m orts	Nom bre de blessés	Autres dom mages
0	0	Abandon et rebouchage du forage
PHOTO		
		
Historique de foration du puits avec mention des évènements survenus (Saito et al., 1998)		
REFERENCES		
https://geothermal-energy-journal.springeropen.com/track/pdf/10.1186/s40517-018-0113-4.pdf Saito S, Sakuma S, Uchida T, 1998. Drilling procedures, techniques and test results for a 3.7 km deep, 500°C exploration well, Kakkonda, Japan. Geothermics Vol.27, No 5/6: 573-590.		

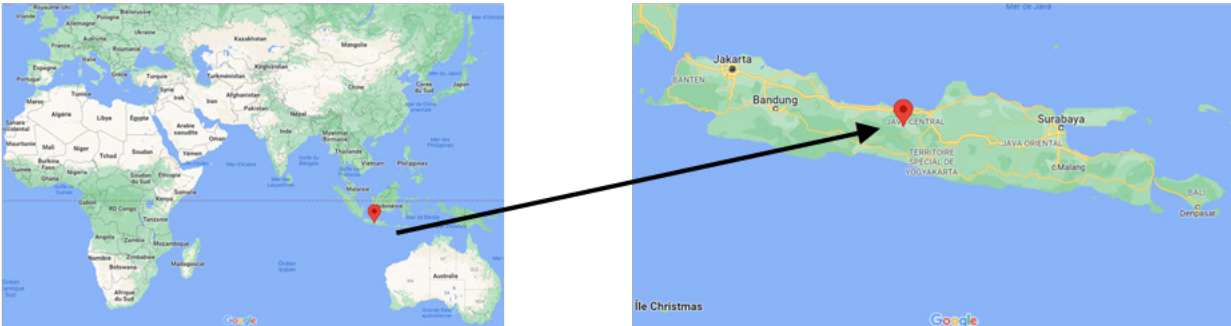
FICHE N° 2007-ISL		
LOCALISATION		
Pays :	Région :	Site :
Islande	Hengill	Hellisheiði Power Station
Date :	Phase du projet :	Type de centrale :
24/06/2014	Test	0
		
DESCRIPTION DE L'INCIDENT / ACCIDENT		
Au cours d'un programme de redémarrage de la centrale, du gaz chargé de H₂S s'est échappé dans le hall des machines où travaillaient les opérateurs et le personnel de l'entreprise.		
ANALYSE DES CAUSES ET DES ACTIONS		
La pression s'est accumulée dans les collecteurs de condensat et les vannes de décharge se sont ouvertes. Le gaz qui s'est échappé était resté dans les condenseurs lorsque la vapeur s'est condensée après l'arrêt de la centrale. Le hall des turbines a dû être fermé et du personnel en scaphandre est intervenu pour fermer les vannes. Trois travailleurs ont été gravement intoxiqués : l'un a perdu connaissance mais a rapidement repris ses esprits, les autres ont présenté des symptômes d'empoisonnement plus légers. Les examens médicaux n'ont révélé aucun effet durable sur la santé et les hommes ont repris le travail le lendemain. Après ces incidents, les valves défectueuses ont été remplacées, les voies d'évacuation ont été redessinées et des respirateurs à air comprimé installés aux endroits critiques.		
CONSEQUENCES		
Nom bre de m orts	Nombre de blessés	Autres dom mages
0	3	Evacuation du hall des turbines
PHOTO		
		
Vues de la centrale géothermique de HengillHellisheiði Power Station (Source : Wikipedia)		
REFERENCES		
Danielsson F, Fendler R, Hailwood M, Shrivs J, 2009. Analysis of H₂S – incidents in geothermal and other industries. Preliminary analysis of data. OECD WGCA Steering Group of Analysis of H₂S Incidents, September 4th 2009, 52 p.		

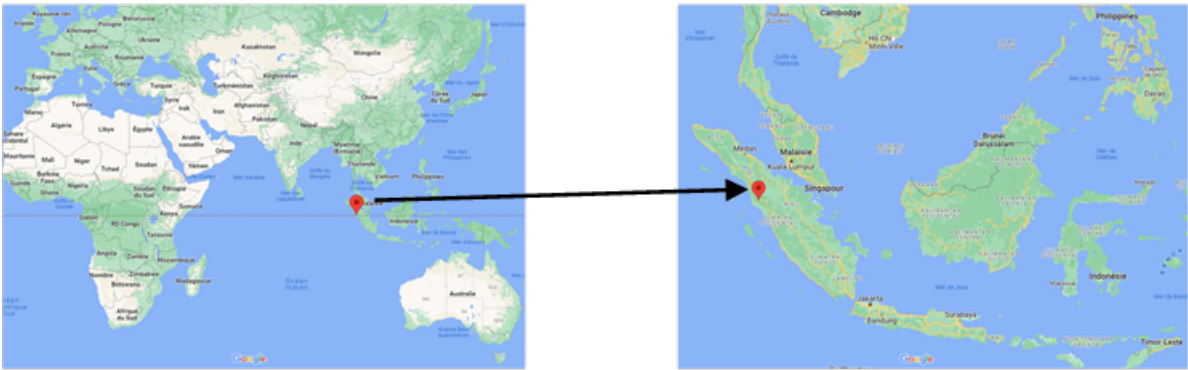
FICHE N° 2008-NZL		
LOCALISATION		
Pays :	Région :	Site :
Nouvelle-Zélande	Île Nord	Kawereau
Date :	Phase du projet :	Type de centrale :
24/04/2008	Exploitation	Centrale électrique
		
DESCRIPTION DE L'INCIDENT / ACCIDENT		
Deux ouvriers ont été intoxiqués par un panache de gaz alors qu'ils travaillaient à quelques mètres de l'évent d'un silencieux haute pression. Les deux ouvriers ont perdu connaissance et ont été traités sur place puis emmenés à l'hôpital. Quatre jours plus tard, un deuxième incident identique a concerné deux ouvriers qui se sont sentis mal et a entraîné une nouvelle évacuation d'urgence de tout le site.		
ANALYSE DES CAUSES ET DES ACTIONS		
Les deux incidents ont entraîné l'évacuation d'urgence de tout le site. Lors du second incident, un opérateur spécialisé surveillait pourtant la zone de séparation de la vapeur avec un détecteur de gaz. A aucun moment, un niveau élevé de H₂S n'a été détecté ni par l'opérateur, ni par aucun des autres détecteurs présents sur le site. Pendant l'évacuation, les pompiers ont parcouru le site en portant un appareil respiratoire complet et ont déclaré que le site était exempt de niveaux élevés de H₂S. L'un des ouvriers concerné par ce second incident était l'une des deux victimes de l'incident précédent : il a ensuite été diagnostiqué par le personnel médical comme étant sensibilisé à l'exposition à de petites quantités de H₂S à la suite de ce premier incident. L'autre ouvrier a été diagnostiqué a posteriori comme souffrant d'une autre maladie le rendant également sensible à l'H₂S.		
CONSEQUENCES		
Nombre de morts	Nombre de blessés	Autres dommages
0	4	Evacuation du site
PHOTO		
		
Silencieux haute et basse pression (à g.) sur la centrale de Kawereau (à d.) (Ware et Hochwimmer, 2010)		
REFERENCES		
Ware P, Hochwimmer A, 2010. Health and Safety Aspects of the Kawerau Project, Mighty River Power. Proceedings World Geothermal Congress 2010 Bali, Indonesia, 25-29 April 2010, 9 p		

FICHE N° 2014-PHL		
LOCALISATION		
Pays :	Région :	Site :
Philippines	Biliran Island	BGI
Date :	Phase du projet :	Type de centrale :
24/06/2014	Test	0
		
DESCRIPTION DE L'INCIDENT / ACCIDENT		
Huit ouvriers du Biliran Geothermal Incorporated (BGI) ont été intoxiqués par un dégazement brutal de gaz renfermant de l'H₂S en phase de test d'un forage géothermique.		
ANALYSE DES CAUSES ET DES ACTIONS		
Selon un rapport médical de l'hôpital provincial de Biliran, où ils ont reçu un traitement immédiat, ces ouvriers ont souffert d'un empoisonnement à l'H₂S. Cependant, la déclaration officielle du BGI mentionne que "L'enquête initiale montre que le H₂S a été contrôlé et que c'est un gaz de type ammoniac qui a provoqué l'inconscience du personnel. Il n'y a pas eu de blessé grave."		
CONSEQUENCES		
Nom bre de m orts	Nombre de blessés	Autres dom mages
0	8	0
PHOTO		
		
Vue du site géothermique de Biliran		
REFERENCES		
https://www.biliranisland.com/blogs/2014/06/22/at-biliran-geothermal-project-eight-workers-hurt-in-gas-poisoning/		

FICHE N° 2017-FRA		
LOCALISATION		
Pays :	Région :	Site :
France	Île-de-France	Sucy-en-Brie
Date :	Phase du projet :	Type de centrale :
13/09/2017	Exploitation	Chaleur géothermique
		
DESCRIPTION DE L'INCIDENT / ACCIDENT		
Un dégagement de vapeur d'eau contenant de l'H ₂ S s'est produit dans une salle inondée d'une centrale géothermique.		
ANALYSE DES CAUSES ET DES ACTIONS		
A leur arrivée, les pompiers ont détecté une concentration de 20 ppm dans l'air. Ils ont évacué les riverains et coupé l'électricité dans l'installation. L'exploitant a pompé l'eau présente dans les locaux vers un réservoir. Une pièce défectueuse a été identifiée sur le circuit d'eau, mais sa défaillance ne peut expliquer à elle seule les quantités en présence. Une infiltration d'eau de pluie a donc suspectée mais le diagnostic réalisé par la suite a finalement conclu que « suite à la remontée inhabituelle de dépôts par la ligne de production géothermale, une brutale montée en pression dans la centrale a généré l'ouverture d'une soupape de sécurité ». On ne sait pas d'où viennent ces dépôts mais leur présence dans l'eau « a empêché la soupape de se refermer, générant une accumulation rapide d'eau géothermale à 75°C dans la centrale géothermique qui a servi de rétention ». Finalement « de la vapeur d'eau s'est donc échappée par les ventilations, emmenant une partie des gaz présents naturellement dans la source géothermale et notamment du H₂S, dangereux à forte concentration dans des espaces fermés et non aérés ».		
CONSEQUENCES		
Nombre de morts	Nombre de blessés	Autres dommages
0	0	Evacuation de 70 personnes
PHOTO		
		
Chaufferie de géothermie de Sucy-en-Brie (https://www.leparisien.fr/val-de-marne-94/sucy-en-brie-94370/sucy-des-matieres-solides-inhabituelles-a-l-origine-du-probleme-de-geothermie-24-09-2017-7283556.php)		
REFERENCES		
https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/50375/ https://www.leparisien.fr/val-de-marne-94/sucy-en-brie-94370/sucy-des-matieres-solides-inhabituelles-a-l-origine-du-probleme-de-geothermie-24-09-2017-7283556.php		

FICHE N° 2021-IDN		
LOCALISATION		
Pays :	Région :	Site :
Indonésie	Flores Island	Sorik Marapi
Date :	Phase du projet :	Type de centrale :
25/01/2021	Exploitation	Centrale électrique
		
DESCRIPTION DE L'INCIDENT / ACCIDENT		
Lors d'une manœuvre dite de « décharge de puits », classique en phase d'exploitation d'une centrale géothermique, l'équipe de test a commencé à ouvrir le puits SMP-T02 et a constaté une émission de fluide sombre par l'évent du silencieux. Pendant trois minutes, un panache de gaz a été émis et s'est déplacé horizontalement vers les zones de rizières et de champs alentour. Puis de la vapeur géothermique est arrivée, sortant verticalement et purgeant le silencieux.		
ANALYSE DES CAUSES ET DES ACTIONS		
Au moment de l'accident, des villageois se trouvaient dans les rizières situées à environ 300-500 m de l'emplacement du puits géothermique. Cette fuite d'hydrogène sulfuré a entraîné la mort de 5 personnes et intoxiqué 46 autres. Il n'a pas été précisé si des employés avaient été blessés. La société a admis qu'un certain nombre de ses détecteurs n'ont pas fonctionné pendant la fuite.		
CONSEQUENCES		
Nombre de morts	Nombre de blessés	Autres dommages
5	46	Fermeture temporaire du puits incriminé
PHOTO		
		
Vue de la centrale géothermique de Sorik Marapi (https://www.esdm.go.id/)		
REFERENCES		
https://www.yicaglobal.com/news/kaishan-compressor-dives-after-five-die-in-toxic-gas-leak-at-indonesian-project		

FICHE N° 2022a-IDN		
LOCALISATION		
Pays :	Région :	Site :
Indonésie	Central Java	GDE Dieng
Date :	Phase du projet :	Type de centrale :
2022	Foration	Centrale électrique
		
DESCRIPTION DE L'INCIDENT / ACCIDENT		
Un puits en cours de foration à la centrale géothermique Geo Dipa (PLTP) à Dieng, Banjarnegara, Java central, a libéré des gaz toxiques renfermant du H2S. Il n'y a pas eu d'éruption mais un dégagement de gaz toxique lorsqu'un ouvrier a vérifié une soupape de sécurité sur une pompe à boue lors de la préparation du forage du puits numéro 28. L'exploitant a déclaré que toutes les procédures de sécurité standard étaient pourtant appliquées au moment de l'incident.		
ANALYSE DES CAUSES ET DES ACTIONS		
Il semble s'agir du dysfonctionnement d'un équipement mais la cause exacte doit être déterminée par l'enquête de l'inspecteur des énergies renouvelables du ministère de l'énergie et des ressources minérales.		
CONSEQUENCES		
Nombre de morts	Nombre de blessés	Autres dommages
1	7	Evacuation de 15 employés
PHOTO		
		
Vue de la centrale géothermique de Geo Dipa Energy à Dieng (The Jakarta Post Image)		
REFERENCES		
https://www.upstreamonline.com/safety/fatal-incident-at-indonesian-geothermal-plant/2-1-1185978 https://voi.id/en/news/144637/geo-dipa-pltp-drilling-well-explosion-one-person-dies-from-inhaling-h2s-gas		

FICHE N° 2022b-IDN		
LOCALISATION		
Pays :	Région :	Site :
Indonésie	Sibanggor Julu	Sorik Marapi
Date :	Phase du projet :	Type de centrale :
24/04/2022	Foration	0
		
DESCRIPTION DE L'INCIDENT / ACCIDENT		
Deux puits en cours de foration appartenant à PT Sorik Merapi Geothermal Power (SMGP) ont émis de la boue chaude ainsi que du gaz renfermant de l'H₂S dans le village de Sibanggor Julu, district de Puncak Sorik Merapi, régence de Madina.		
ANALYSE DES CAUSES ET DES ACTIONS		
Au total, 21 résidents ont dû être soignés à l'hôpital de Panyabungan en raison d'une intoxication au gaz H₂S. Les symptômes ressentis par les résidents sont presque les mêmes, à savoir des vertiges, des vomissements et des nausées.		
CONSEQUENCES		
Nom bre de m orts	Nombre de blessés	Autres dom mages
0	21	Evacuation de la population
PHOTO		
		
Vue de l'éruption de gaz et de boue (https://nbcnews.my.id/)		
REFERENCES		
https://tanahair.net/21-people-injured-after-hot-mud-surged-out-in-north-sumatra-geothermal-plant/		