

Directives environnementales, sanitaires et sécuritaires pour la production d'électricité géothermique

Introduction

Les Directives environnementales, sanitaires et sécuritaires (Directives EHS) sont des documents de références techniques qui présentent des exemples de bonnes pratiques internationales¹, de portée générale ou concernant une branche d'activité particulière. Lorsqu'un ou plusieurs États membres participent à un projet du Groupe de la Banque mondiale, les Directives EHS doivent être suivies conformément aux politiques et normes de ces pays. Les Directives EHS établies pour les différentes branches d'activité sont conçues pour être utilisées conjointement avec les **Directives EHS générales**, qui présentent des principes directeurs environnementaux, sanitaires et sécuritaires applicables dans tous les domaines. Les projets complexes peuvent exiger l'application de plusieurs directives couvrant des branches d'activité différentes. La liste complète de ces directives figure à l'adresse suivante : www.ifc.org/ifcext/sustainability.nsf/Content/EnvironmentalGuidelines

Les Directives EHS indiquent les mesures et les niveaux de performances qui sont généralement considérés réalisables dans de nouvelles installations avec les technologies existantes à un coût raisonnable. L'application des Directives EHS dans des installations existantes peut nécessiter la définition

¹ C'est-à-dire les pratiques que l'on peut raisonnablement attendre de professionnels qualifiés et chevronnés faisant preuve de compétence professionnelle, de diligence, de prudence et de prévoyance dans le cadre de la poursuite d'activités du même type dans des circonstances identiques ou similaires partout dans le monde. Les circonstances que des professionnels qualifiés et chevronnés peuvent rencontrer lorsqu'ils évaluent toute la gamme des techniques de prévention de la pollution et de dépollution applicables dans le cadre d'un projet peuvent inclure, sans toutefois s'y limiter, divers degrés de dégradation environnementale et de capacité d'assimilation de l'environnement ainsi que différents niveaux de faisabilité financière et technique.

d'objectifs spécifiques et l'établissement d'un calendrier adapté pour atteindre ces objectifs. Le champ d'application des Directives EHS doit être fonction des aléas et des risques identifiés pour chaque projet sur la base des résultats d'une évaluation environnementale qui prend en compte des éléments spécifiques au projet, comme les conditions en vigueur dans le pays dans lequel le projet est réalisé, la capacité d'assimilation de l'environnement, et d'autres facteurs propres au projet. La mise en œuvre de recommandations techniques particulières doit être établie sur base de l'opinion professionnelle des personnes ayant les qualifications et l'expérience nécessaires. Si les seuils et normes stipulés dans les réglementations du pays d'accueil diffèrent de ceux indiqués dans les Directives EHS, les plus rigoureuses seront retenues pour les projets menés dans ce pays. Si des niveaux moins contraignants que ceux des Directives EHS peuvent être retenus pour des raisons particulières dans le contexte du projet, une justification détaillée pour chacune de ces alternatives doit être présentée dans le cadre de l'évaluation environnementale du site considéré. Cette justification devra montrer que les niveaux de performance proposés permettent de protéger la santé de la population humaine et l'environnement.

Champ d'application

Les présentes Directives EHS concernent la production d'électricité géothermique. Une description générale des activités de production d'électricité géothermique figure à l'**Annexe A**. Les questions connexes de transport et de distribution sont couvertes dans les Directives EHS pour le transport et la distribution de l'électricité.

Ce document se compose des sections ci-après :

Section 1.0 - Description et gestion des impacts propres aux activités considérées
 Section 2.0 - Indicateurs de performance et suivi des résultats
 Section 3.0 - Bibliographie
 Annexe A - Description générale des activités

1.0 Description et gestion des impacts propres aux activités considérées

La section suivante présente un résumé des questions EHS liées à la production d'électricité géothermique et des recommandations pour la gestion desdites questions. Les recommandations relatives à la gestion des questions communes à la plupart des projets de grande envergure figurent dans les **Directives EHS générales**.

1.1 Environnement

Les questions environnementales qui risquent de survenir au cours des projets de production d'électricité géothermique portent sur les aspects suivants²:

- Effluents
- Emissions atmosphériques
- Déchets solides
- Éruption des puits et défaillance des conduites
- Consommation et extraction de l'eau

Effluents

Fluides et déblais de forage

Les puits de production et de réinjection de la vapeur peuvent être installés au cours des activités d'exploration, d'aménagement et d'exploitation. Les boues de forage utilisées lors des activités de forage peuvent être à base d'eau ou d'huile

et peuvent contenir des additifs chimiques qui servent à contrôler les pressions différentielles dans les trous de forage et empêcher la dégradation de la viscosité. Les déblais de forage issus des boues de forage à base d'huile sont particulièrement préoccupants en raison de leur teneur en contaminants huileux et peuvent nécessiter un traitement sur site ou hors site et une élimination spécifique. Les recommandations relatives à la gestion des déblais et des fluides de forage englobent les mesures suivantes :

- Récupérer et stocker les fluides et les déblais de forage dans des réservoirs ou des cuves de stockage consacrés à cet effet et revêtus d'une membrane imperméable, avant de procéder au traitement (p. ex., lavage), au recyclage et/ou au traitement final et à l'élimination ;
- Réutiliser les fluides de forage ;
- Retirer les réservoirs ou les cuves pour éviter la libération immédiate ou ultérieure de matières huileuses dans le sol et les ressources en eau, et traiter/éliminer les contenus en tant que déchets dangereux ou non dangereux, en fonction de leurs caractéristiques (voir les **Directives EHS générales**) ;
- Éliminer les fluides de forage à base d'eau dans le trou de forage, après avoir évalué leur toxicité. Les déblais de forage à base d'eau sont généralement réutilisés s'ils ne sont pas toxiques (p. ex., comme matériau de remplissage pour la construction) ou sont éliminés dans une décharge ;
- Au cours du traitement acide des puits, utiliser des tubages étanches jusqu'à une profondeur appropriée pour la formation géologique, afin d'éviter des fuites de fluides acides dans les eaux souterraines.

Fluides géothermiques usés

Les fluides géothermiques usés comprennent l'eau rejetée par les séparateurs de vapeur (l'eau rejetée est l'eau qui accompagne initialement la vapeur provenant du réservoir

² Duffield and Sass (2003)

géothermique) et le condensat dérivé de la condensation de la vapeur usée après la génération d'électricité. Les installations qui utilisent des tours de refroidissement de l'eau par évaporation dirigent généralement le condensat géothermique vers le cycle de refroidissement. Le condensat géothermique peut se caractériser par une température élevée, un pH faible, et une teneur en métaux lourds. Les eaux rejetées par les séparateurs ont souvent un pH neutre et peuvent contenir des métaux lourds.³ La formation de vapeur et la qualité de l'eau varient en fonction des caractéristiques de la ressource géothermique.

Les mesures préconisées pour gérer les fluides géothermiques sont indiquées ci-après :

- Évaluer soigneusement les impacts environnementaux potentiels des rejets de fluides géothermiques, en fonction du système de refroidissement choisi ;⁴
- Si les installations ne réinjectent pas tous les fluides géothermiques dans le sous-sol, la qualité des effluents rejetés doit correspondre à l'utilisation du plan d'eau récepteur, comme le décrivent les **Directives EHS générales**. Il peut être nécessaire, entre autres, d'ajuster la température des effluents conformément aux réglementations locales ou à une norme propre au site, sur la base des impacts potentiels sur le plan d'eau récepteur. Si des concentrations élevées de métaux lourds sont détectées dans les fluides géothermiques, il faut alors effectuer un contrôle préalable des rejets dans les plans d'eau naturels, et ce contrôle peut nécessiter la construction et l'exploitation d'installations de traitement complexes et coûteux ;
- Là où la réinjection est l'alternative choisie, le potentiel de contamination des eaux souterraines doit être minimisé en

³ Kestin (1980)

⁴ Il est possible que la réinjection soit l'alternative préférée dans certains cas, pour prolonger la durée de vie du réservoir.

installant des tubages étanches dans les puits d'injection, de même profondeur que la formation géologique qui héberge le réservoir géothermique ;

- Les opportunités de réutilisation des fluides géothermiques doivent être envisagées, parmi lesquelles figurent :
 - L'utilisation des techniques de production d'électricité binaire ;
 - L'emploi dans les procédés industriels à l'aval si la qualité de l'eau rejetée (y compris les niveaux de métaux lourds totaux et dissous) correspond aux exigences de qualité pour l'utilisation anticipée. À titre d'exemples d'utilisation à l'aval, on peut citer les installations génératrices de chaleur dans le cadre des serres, de l'aquaculture, du chauffage des locaux, de la transformation des aliments/fruits, et à des fins récréatives dans les hôtels/centres de détente.
 - Le rejet final des fluides usés conformément aux exigences en matière de traitement et de rejet pour l'activité applicable, s'il en est une, et correspondant à l'utilisation du plan d'eau récepteur, selon les indications fournies dans les **Directives EHS générales**.

Émissions atmosphériques

Les émissions des centrales géothermiques sont négligeables par rapport à celles des centrales alimentées par des sources d'énergie fossile.⁵ Les sulfures d'hydrogène et le mercure sont les principaux polluants atmosphériques potentiels associés à la production d'électricité géothermique utilisant des techniques de vapeur de détente ou de vapeur sèche. Du dioxyde de carbone est présent dans la vapeur, bien que son émission soit également considérée négligeable par rapport aux sources de combustion des combustibles fossiles. La présence et la

⁵ Par exemple, une centrale géothermique émet l'équivalent d'environ 1 % des émissions d'oxyde de soufre (SO_x) et d'oxyde d'azote (NO_x), et 5 % des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) d'une centrale thermique alimentée au charbon ayant la même puissance installée. Duffield and Sass (2003)).

concentration de polluants atmosphériques potentiels peuvent varier en fonction des caractéristiques de la ressource géothermique.

Les émissions peuvent provenir des activités de forage des puits et des tests de débit, et des systèmes de condensateur/tour de refroidissement à contact ouvert, à moins d'être extraites des condenseurs par pompage et réinjectées dans le réservoir avec les fluides géothermiques rejetés. Les silencieux des dispositifs de ventilation des champs de puits et des sites des centrales peuvent être également des sources potentielles d'émissions de sulfure d'hydrogène, principalement au cours de conditions anormales d'exploitation, lorsque la ventilation est nécessaire. Les technologies binaire et combinée flash/binaire (avec des techniques de condensation sans contact) produisent des émissions atmosphériques de sulfure d'hydrogène ou de mercure presque nulles parce que tous les fluides et gaz géothermiques sont réinjectés.

Il convient d'adopter les recommandations suivantes en matière de gestion des émissions atmosphériques :

- Envisager les options technologiques qui comprennent la réinjection totale ou partielle des gaz avec les fluides géothermiques, dans le contexte des impacts environnementaux potentiels des technologies de production alternatives et en tenant compte d'autres facteurs primaires, comme les caractéristiques adéquates de la technologie par rapport à la ressource géologique et aux considérations économiques (p. ex., coûts d'investissement et d'exploitation/de maintenance) ;
- Lorsque la réinjection totale n'est pas faisable, ventiler le sulfure d'hydrogène et le mercure volatil non condensable dans la mesure où, sur la base d'une évaluation de l'impact potentiel sur les concentrations ambiantes, les niveaux de pollution ne dépassent pas les normes applicables en matière de sécurité et de santé ;

- Si nécessaire, utiliser des systèmes de réduction pour retirer les émissions de sulfure d'hydrogène et de mercure des gaz non condensables. Les contrôles du sulfure d'hydrogène peuvent inclure des systèmes d'épuration par voie humide ou sèche ou des systèmes de réduction/d'oxydation en phase liquide, et les contrôles des émissions de mercure peuvent englober la condensation des flux gazeux assortie de méthodes de séparation et d'adsorption additionnelles.

Déchets solides

Les technologies géothermiques ne produisent pas une quantité importante de déchets solides. Les précipités de sulfure, de silice et de carbonate sont généralement récupérés des tours de refroidissement, des systèmes de purification de l'air, des turbines et des séparateurs de vapeur. Ces boues peuvent être classifiées comme dangereuses en fonction de la concentration et du potentiel de lixiviation des composés de silice, des chlorures, de l'arsenic, du mercure, du vanadium, du nickel et d'autres métaux lourds. Les mesures préconisées en matière de gestion des déchets dangereux sont examinées dans les **Directives EHS générales** et impliquent un stockage et un confinement appropriés sur le site avant le traitement final et l'élimination dans un centre de décharge approprié. Si les boues sont d'une qualité acceptable et n'ont pas une teneur significative en métaux lixiviables (c.-à-d., qu'elles sont des déchets non dangereux), il est possible d'envisager leur réutilisation sur site ou à l'extérieur du site en tant que matériau de remplissage, comme option d'élimination potentielle. Les matières solides récupérables telles que les gâteaux de soufre doivent être recyclées par des tiers, dans la mesure du possible⁶. Les circuits d'élimination doivent être déterminés initialement, en procédant à des analyses chimiques des précipités qui doivent être répétées périodiquement (p. ex.,

⁶ La fabrication d'engrais agricoles est un exemple de revalorisation.

annuellement) pour tenir compte des variations géochimiques potentielles et des impacts sur la qualité des déchets.

Éruption des puits et défaillance des conduites

Bien qu'elles soient très rares, les éruptions des puits et les défaillances des conduites risquent de se produire au cours du forage des puits ou du fonctionnement des installations. De telles défaillances peuvent résulter en la libération d'additifs et de fluides de forage toxiques, et de gaz de sulfure d'hydrogène provenant des formations du sous-sol. Les ruptures des conduites peuvent également provoquer la libération de fluides et de vapeur géothermiques contenant des métaux lourds, des acides, des dépôts minéraux et d'autres polluants.

Les mesures suivantes sont recommandées pour empêcher et maîtriser la pollution dans le cadre des éruptions de puits et des ruptures de conduite :

- Assurer la maintenance régulière des têtes de puit et des conduites des fluides géothermiques, y compris le contrôle et l'inspection de la corrosion ; effectuer des activités de suivi en ce qui concerne la pression ; et utiliser un matériel de prévention des éruptions, comme des vannes d'arrêt ;
- Mettre au point un programme d'intervention d'urgence pour les éruptions de puits et les ruptures de conduite, y compris des mesures de confinement des épanchements de fluides géothermiques⁷.

La planification du programme d'intervention d'urgence est examinée dans **Directives EHS générales**.

Consommation et extraction d'eau

L'extraction des eaux de surface est nécessaire pour une variété d'activités de production d'électricité géothermique, y compris le forage des puits, les tests d'injectabilité dans les

formations souterraines et l'utilisation dans les systèmes de refroidissement. Les eaux de surface utilisées pour le refroidissement, en un seul passage et sans contact, sont généralement renvoyées à la source en ayant une teneur en chaleur un peu plus élevée, mais sans que la qualité de l'eau dans son ensemble ne soit altérée.

Afin de conserver les sources d'eau utilisées pour appuyer les activités de production d'électricité géothermique, il convient de :

- Évaluer les données hydrologiques enregistrées pour connaître la variabilité à court terme et à long terme des flux qui servent de sources d'eau, et assurer que les flux critiques sont maintenus au cours des périodes de faible écoulement, afin de ne pas obstruer le passage des poissons ou causer des impacts négatifs sur les organismes vivants aquatiques ;
- Surveiller les différences de températures des effluents et des plans d'eau récepteurs pour satisfaire aux réglementations locales en matière de rejet thermique ou, en l'absence de telles réglementations, s'aligner sur les indications précédentes du présent document.

1.2 Hygiène et sécurité au travail

Les questions relatives à l'hygiène et à la sécurité au travail, au cours de la construction et de la mise hors service des projets de production d'électricité géothermique, sont semblables à celles des autres établissements industriels. Leur prévention et leur maîtrise sont examinées dans les **Directives EHS générales**.

Les aspects liés à l'hygiène et à la sécurité au travail qui sont spécifiques aux projets d'électricité géothermique concernent potentiellement l'exposition aux éléments suivants :

⁷ Pour plus d'information, consulter Babok and Toth (2003).

- Gaz géothermiques
- Espaces confinés
- Chaleur
- Bruit

Gaz géothermiques

L'exposition sur le lieu de travail aux gaz géothermiques, principalement le gaz de sulfure d'hydrogène, peut être occasionnée par une libération anormale des fluides géothermiques (par suite, notamment, de la défaillance de conduites) et les activités de maintenance dans des espaces confinés tels que les conduites, les turbines et les condensateurs. L'importance du risque causé par le sulfure d'hydrogène peut varier en fonction de l'emplacement et de la formation géologique propres à l'installation concernée.

Là où il y a un potentiel d'exposition au sulfure d'hydrogène à des niveaux dangereux, les installations de génération d'électricité géothermiques doivent envisager les mesures de gestion suivantes :

- Installation de systèmes de surveillance et d'alerte relatifs aux émanations de sulfure d'hydrogène. Le nombre et les emplacements des appareils de surveillance doivent être fixés sur la base d'une évaluation des risques d'émissions de sulfure d'hydrogène et d'exposition à ce gaz dans les diverses zones des installations^{8, 9} ;
- Préparer un plan d'intervention en cas d'émission de sulfure d'hydrogène, qui couvre tous les aspects nécessaires de l'intervention, depuis l'évacuation jusqu'à la reprise des opérations normales ;
- Mettre à disposition des équipes d'intervention d'urgence dans les installations ; fournir aux travailleurs qui opèrent

⁸ Il est nécessaire de programmer des seuils d'alerte pour l'établissement et les dispositifs de surveillance du sulfure d'hydrogène individuels nettement inférieurs aux normes sécuritaires standard, sur la base des conseils d'un spécialiste de la sécurité au travail.

dans des zones à risque élevé d'exposition des dispositifs de surveillance du sulfure d'hydrogène individuels, des appareils respiratoires autonomes et des alimentations en oxygène de secours, ainsi qu'une formation pour une utilisation sécuritaire et efficace ;

- Assurer une ventilation suffisante des locaux habités ainsi que des systèmes de sécurité appropriés (sas à air, arrêt de la ventilation dès détection d'une fuite de gaz) pour éviter l'accumulation de sulfure d'hydrogène ;
- Élaborer et mettre en œuvre des procédures d'entrée dans les espaces confinés pour les aires désignées comme « espaces confinés » (voir ci-après) ;
- Fournir aux travailleurs des fiches d'information ou d'autres renseignements facilement accessibles relatifs à la composition chimique des stades liquides et gazeux, en les accompagnant d'une explication sur les implications potentielles pour la santé et la sécurité des individus.

Espaces confinés

Les risques que présentent les espaces confinés, dans cette branche et toute autre branche d'activité industrielle, sont potentiellement fatals. L'entrée des travailleurs dans des espaces confinés et le potentiel d'accident peuvent varier parmi les installations géothermiques en fonction de la conception, du matériel sur site, et de la présence d'eaux souterraines ou de fluides géothermiques. Les aires spécifiques et uniques qui comportent des entrées dans des espaces confinés peuvent englober les turbines, les condensateurs et les tours de refroidissement de l'eau (au cours des activités de maintenance), les abris pour le matériel de surveillance (au cours de l'échantillonnage) et la « cave » du puits de forage (dépression souterraine créée à des fins de forage). Les responsables des installations d'électricité géothermiques doivent élaborer et mettre en place des procédures d'entrée

dans les espaces confinés, comme indiqué dans les **Directives EHS générales**.

Chaleur

Les travailleurs sont exposés à la chaleur au cours des activités de construction, d'exploitation et de maintenance des tuyaux, des puits et du matériel chaud connexe. Les expositions non routinières englobent les accidents d'éruption potentielle au cours du forage et les dysfonctionnements des systèmes de confinement de la vapeur et des installations de transport.

Les mesures permettant d'empêcher et de maîtriser l'exposition à la chaleur consistent à :

- Réduire la durée d'exécution des travaux dans les environnements à température élevée et veiller à ce que de l'eau potable soit accessible ;
- Revêtir les surfaces d'écrans protecteurs là où les travailleurs entrent en contact étroit avec du matériel chaud, y compris le matériel de production de la chaleur, les tuyaux, etc. ;
- Utiliser un équipement de protection individuel (EPI) selon les besoins, y compris des gants et des chaussures isolantes ;
- Mettre en application des procédures de sécurité appropriées au cours du processus de forage exploratoire.

Bruit

Les sources de bruit dans les installations géothermiques sont principalement liées au forage des puits, à la vaporisation instantanée et à la ventilation. Les autres sources sont liées au matériel des installations de pompage, aux turbines et aux activités temporaires de rinçage des conduites. Les niveaux des bruits temporaires peuvent être supérieurs à 100 dBA au cours de certaines activités de forage et de ventilation de la vapeur.

Les techniques de réduction du bruit englobent l'utilisation de

silencieux en laine de pierre, l'isolation acoustique et la mise en place de barrières lors des forages, en plus des silencieux placés sur le matériel des installations de transformation de la vapeur. Des recommandations supplémentaires en matière de gestion des bruits et des vibrations au travail, telles que l'utilisation d'EPI appropriés, sont examinées dans les **Directives EHS générales**.

1.3 Santé et sécurité de la population

Les questions relatives à la santé et à la sécurité de la population durant la construction et lors de la mise hors service des centrales géothermiques sont communes à la plupart des établissements industriels de grande envergure et sont examinées dans les **Directives EHS générales**.

Les questions relatives à la santé et à la sécurité des communautés au cours de l'exploitation des centrales géothermiques portent sur les aspects suivants :

- Exposition au gaz de sulfure d'hydrogène
- Sécurité des infrastructures
- Impacts sur les ressources en eau

Sulfure d'hydrogène

En plus de la prévention et de la maîtrise des émissions et de l'exposition liées au gaz de sulfure d'hydrogène décrites dans les sections sur la santé et la sécurité environnementale et au travail, le potentiel d'exposition de la population doit être soigneusement examiné au stade de la planification et les précautions nécessaires mises en œuvre. Là où le potentiel d'exposition des communautés est significatif, les mesures de réduction suivantes doivent être envisagées :

- L'implantation des sources d'émissions significatives pouvant exposer les communautés avoisinantes au gaz de sulfure d'hydrogène doit tenir compte de facteurs

- environnementaux clés comme la proximité, la morphologie, et les directions des vents prédominants ;
- Installer un réseau de surveillance des émissions de sulfure d'hydrogène, le nombre et l'emplacement des postes de contrôle étant déterminés sur la base du modèle de dispersion de l'air compte tenu de l'emplacement des sources d'émissions et des aires d'occupation et d'habitation des communautés ;
 - Faire fonctionner en continu les systèmes de surveillance des émissions de sulfure d'hydrogène afin de faciliter leur détection et de donner une alerte rapide.
 - Planifier les interventions d'urgence avec la participation de la communauté afin d'assurer une réaction efficace lorsque l'alerte est donnée par le système de surveillance.

Sécurité des infrastructures

Les communautés risquent d'être exposées aux risques corporels associés aux puits et aux réseaux connexes des conduites. Les risques peuvent provenir du contact avec des composants chauds, de la défaillance du matériel, ou de la présence d'une infrastructure de puits active ou abandonnée qui peut générer des risques liés aux espaces confinés et aux chutes. Parmi les techniques de gestion recommandées pour réduire lesdits impacts, il convient de :

- Mettre en place des éléments dissuasifs pour éviter l'accès, comme des barrières et des signaux d'avertissement, et mettre en garde sur les risques existants ;
- Minimiser la longueur des systèmes de conduites nécessaires ;
- Examiner la faisabilité de conduites souterraines ou d'écrans protecteurs de la chaleur pour empêcher que le grand public n'entre en contact avec des conduites géothermiques chaudes ;

- Gérer la fermeture des infrastructures comme les conduites et les routes d'accès, y compris : le nettoyage, le démontage et le retrait du matériel, l'analyse de la qualité du sol doublée d'opérations de nettoyage là où cela est justifié ; la revégétalisation du site et son blocage ; et la remise en état des routes d'accès là où cela est nécessaire ;
- Gérer la fermeture des têtes de puits, en particulier : sceller les puits avec du ciment, retirer les têtes de puits, et mettre des matériaux de remplissage dans la dépression qui entoure la tête de puits, en fonction des besoins.¹⁰

Impacts sur les ressources en eau

L'extraction, la réinjection et le rejet des fluides géothermiques peuvent avoir des effets sur la qualité et la quantité des ressources en eaux de surface et en eaux souterraines. Parmi les exemples d'impacts spécifiques, on peut citer : l'introduction involontaire de fluides géothermiques dans les aquifères productifs moins profonds lors des activités d'extraction et de réinjection, ou le flux réduit des sources thermales chaudes causé par les activités de retrait. Lesdits impacts peuvent être empêchés et maîtrisés comme il est indiqué ci-après :

- Élaborer un modèle géologique et hydrogéologique complet englobant l'architecture géologique, structurelle et tectonique d'ensemble, la dimension du réservoir, les limites, les propriétés géotechniques et hydrauliques de la roche mère ;
- Effectuer une évaluation du bilan hydrogéologique et hydrique lors de la planification du projet, afin d'identifier les interconnexions hydrauliques entre l'extraction géothermique et les points de réinjection et toute source

¹⁰ La mise hors service et la fermeture des infrastructures géothermiques de terrain peuvent nécessiter une planification détaillée, en fonction des questions propres aux sites.

d'eau potable, ou pour connaître les caractéristiques des eaux de surface ;

- Isoler les sources productrices de vapeur des formations hydrologiques moins profondes susceptibles d'être utilisées comme sources d'eau potable, en choisissant soigneusement le site et en concevant et en installant correctement les systèmes de tubage des puits ;
- Éviter les impacts négatifs sur les eaux de surface en introduisant des critères de rejet stricts et des moyens appropriés pour rendre la qualité et la température de l'eau conformes aux normes acceptables.

2.0 Indicateurs de performance et suivi des résultats

2.1 Environnement

Directives pour les émissions et les effluents

Émissions

Des émissions mineures de sulfure d'hydrogène, de vapeur de mercure et de dioxyde de soufre risquent d'apparaître sous forme d'émissions fugitives en provenance de la tour de refroidissement, si le processus de condensation implique un contact direct de la vapeur avec l'eau de refroidissement. Les valeurs indiquées pour les émissions et les effluents industriels dans cette branche d'activité correspondent aux bonnes pratiques internationales en ce domaine, telles qu'exprimées par les normes pertinentes des pays qui ont des cadres réglementaires agréés. Bien que les projets d'électricité géothermique ne génèrent habituellement pas d'émissions de sources ponctuelles significatives au cours de la construction et de l'exploitation, les émissions de sulfure d'hydrogène ou d'autres types d'émissions ne doivent pas résulter en des concentrations ambiantes supérieures aux normes relatives à la

qualité de l'air établies à l'échelon national ou, en leur absence, aux directives reconnues au plan international.¹¹

Effluents

Les fluides géothermiques usés sont généralement réinjectés dans la roche mère, ce qui résulte en des volumes d'effluents qui comportent de faibles quantités d'eaux de rejet. Les contaminants potentiels dans les effluents géothermiques varient en fonction de la minéralogie de la formation géologique mère, de la température de l'eau géothermique, et des processus de l'établissement en fonction du site. Si les fluides géothermiques usés ne sont pas réinjectés, les effluents doivent satisfaire aux niveaux de rejets propres au site concerné pour les eaux de surface, comme examiné dans les **Directives EHS générales**.

Suivi des impacts environnementaux

Des programmes de suivi des impacts environnementaux dans cette branche d'activité doivent être mis en place de manière à couvrir toutes les activités susceptibles d'avoir des impacts environnementaux importants dans des conditions d'exploitation normales ou dans des conditions anormales. Les activités de suivi des impacts environnementaux doivent être basées sur des indicateurs directs ou indirects d'émissions, d'effluents, et d'utilisation des ressources applicables au projet considéré.

Les activités de suivi doivent être suffisamment fréquentes pour fournir des données représentatives sur les paramètres considérés. Elles doivent être menées par des personnes ayant reçu la formation nécessaire à cet effet, suivant des procédures de suivi et de tenue des statistiques et utilisant des instruments bien calibrés et entretenus. Les données produites par les activités de suivi doivent être analysées et examinées à intervalles réguliers et comparées aux normes d'exploitation afin

¹¹ Directives concernant la qualité de l'air, Organisation mondiale de la Santé (OMS), Genève 2000.

de permettre l'adoption de toute mesure corrective nécessaire. De plus amples informations sur les méthodes d'échantillonnage et d'analyse des émissions et des effluents applicables figurent dans les **Directives EHS générales**.

2.2 Hygiène et sécurité au travail

Directives sur l'hygiène et la sécurité au travail

Les résultats obtenus dans le domaine de l'hygiène et de la sécurité au travail doivent être évalués par référence à des directives relatives aux valeurs limites d'exposition professionnelle publiées à l'échelle internationale, comme les directives sur les valeurs limites d'exposition (TLV®) et les indices d'exposition à des agents biologiques (BEIS®) publiés par american conference of governmental industrial hygienists (ACGIH)¹² pocket guide to chemical hazards publié par united states national institute for occupational health and safety (NIOSH)¹³ les valeurs plafonds autorisées (PEL) publiées par occupational safety and health administration of the united states (OSHA)¹⁴ les valeurs limites d'exposition professionnelle de caractère indicatif publiées par les états membres de l'union européenne¹⁵ et autres sources similaires.

Fréquence des accidents mortels et non mortels

Il faut s'efforcer de ramener à zéro le nombre d'accidents du travail dont peuvent être victimes les travailleurs (employés et sous-traitants) dans le cadre d'un projet, en particulier les accidents qui peuvent entraîner des jours de travail perdus, des lésions d'une gravité plus ou moins grande, ou qui peuvent être mortels. Il est possible de comparer les chiffres enregistrés pour les installations des projets à ceux d'installations de pays

¹² Consulter : <http://www.acgih.org/tlv/> et <http://www.acgih.org/store/>

¹³ Consulter : <http://www.cdc.gov/niosh/npg/>

¹⁴ Consulter : http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=9992

¹⁵ Consulter : http://europe.osha.eu.int/good_practice/risks/ds/oel/

développés opérant dans la même branche d'activité présentés dans des publications statistiques (par exemple US Bureau of Labor Statistics et UK Health and Safety Executive)¹⁶.

Suivi de l'hygiène et de la sécurité au travail

Il est nécessaire d'assurer le suivi des risques professionnels posés par les conditions de travail dans le cadre du projet considéré. Ces activités doivent être conçues et poursuivies par des experts agréés¹⁷ dans le contexte d'un programme de suivi de l'hygiène et de la sécurité au travail. Les installations doivent par ailleurs tenir un registre des accidents du travail, des maladies, des événements dangereux et autres incidents. De plus amples informations sur les programmes de suivi de l'hygiène et de la sécurité au travail sont données dans les **Directives EHS générales**.

¹⁶ Consulter: <http://www.bls.gov/iif/> and <http://www.hse.gov.uk/statistics/index.htm>

¹⁷ Les experts agréés peuvent être des hygiénistes industriels diplômés, des hygiénistes du travail diplômés, des professionnels de la sécurité brevetés ou tout titulaire de qualifications équivalentes.

3.0 Bibliographie et sources d'information supplémentaires

Agence internationale de l'énergie. 2003. Appendices to Report on Benign Energy: The Environmental Implications of Renewables. Appendix G Geothermal Paris, France : Agence internationale de l'énergie. Disponible à <http://www.iea.org/pubs/studies/files/benign/pubs/append3g.pdf> (consulté en mars 2003).

ANZECC (Australian and New Zealand Environment Conservation Council). ANZECC. Disponible à <http://www.deh.gov.au/about/councils/anzecc> (consulté en mars 2006).

AS/NZ (Australian/New Zealand Standard on Risk Management). 1999. Australian/New Zealand Standard on Risk Management (AS/NZ 4360:1999). Auckland, NZ: AS/NZ. Disponible à <http://www.uq.edu.au/hupp/index.html?page=30899&pid=30896> (consulté en mars 2006).

Axelsson, G., et Gunnlaugsson, E. 2000. "Background: Geothermal utilization, management and monitoring." In *Long-Term Monitoring of High- and Low Enthalpy Fields under Exploitation*, World Geothermal Congress 2000 Short Courses, Japon, 3–10. Beppu, Japon.

Babok, B., Toth, A., 2003. Geothermal energy production and its environmental impacts in Hungary. International Geothermal Conference , Reykjavik, 2003., pp. 19-25.

Bay Area Air Quality Management District, Regulation 9: Inorganic Gaseous Pollutants, Rule 5 – Hydrogen Sulfide from Geothermal Power Plants. Disponible à <http://www.baaqmd.gov/dst/regulations/index.htm#reg9> (consulté le 11 septembre 2006).

Bloomfield, K., Moore, J.N., et R.M. Neilson Jr. (2003). Geothermal Energy Reduces Greenhouse Gases. Davis, CA.: Geothermal Research Council. GRC Bulletin, Avril 2003.

Brophy, Paul. 1997. "Environmental Advantages to the Utilization of Geothermal Energy." *Renewable Energy* 10:2–3, table 3.374.

Brown, K. L. 2000. "Impacts on the physical environment." In Brown, K.L., ed., *Environmental Safety and Health Issues in Geothermal Development*, World Geothermal Congress 2000 Short Courses, Japon, 43–56. Beppu, Japon.

California Energy Commission. 2002. Overview of Geothermal Energy in California. Sacramento, CA. California Energy Commission. Disponible à <http://www.energy.ca.gov/geothermal/overview> (consulté en mars 2006).

California Vision of Oil Gas and Geothermal Resources. 2004. Geothermal Injection Wells.: California Vision of Oil Gas and Geothermal Resources. Disponible à http://www.consrv.ca.gov/DOG/geothermal/general_info/injection_wells.htm (consulté en mars 2006).

Conseil mondial de l'énergie- site web (Juin 2006) : http://www.worldenergy.org/wec-geis/publications/default/tech_papers/17th_congress/3_1_17.asp

Crecilius, E.A.; Robertson, D.E.; Fruchter, J.S.; et Ludwick, J.D. 1976. Chemical forms of mercury and arsenic emitted by a geothermal power plant. 10th Annual Conference on Trace Substances in Environmental Health. University of Missouri, Columbia, Missouri, États-Unis.

Dipippo, R. 1999. Small Geothermal energy Plant, Design, Performance and Economics. Geothermal Research Council Bulletin (Juin).Davis, Ca.

Duffield, W.A., Sass, J.H. 2003. Geothermal Energy – Clean Power from the Earth's Heat. U.S. Geological Survey.Circular 1249. p. 43

FME (Federal Ministry for the Environment of Germany). 2005. *Geothermal Energy – Energy for the Future*. Werner Burchmann, ed. Berlin, Allemagne :

Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. Disponible à www.bmu.de. (consulté en mars 2006).

Geothermal Hot Line. 1996. Subsidence and Uplift at Heber Geothermal Field. California.

Geothermal Regulatory and Reclamation Program at DOGAMI. Department of Geology and Minerals Industries. Portland, OR. Disponible à <http://www.oregongeology.com/sub/oil/oilhome.htm> (consulté en mars 2006).

Geothermal Training Programme Reports. 2003. Orkustofnun, Grensásvegur 9, Number 5 IS-108. Reykjavík, Islande.

Groupe de la Banque mondiale. 2002. Geothermal Energy. Washington : Groupe de la Banque mondiale. Disponible à <http://www.worldbank.org/html/fpd/energy/geothermal/> (consulté le 6 décembre 2004).

Gutierrez-Negrin, L.C.A., et Quijano-Leon, J.L. 2004. Analysis of Seismicity in the Los Humeros, Mexique Geothermal Field. *Geothermal Resources Council Transactions* 28: 467–72.

Hiroyuki T., H. Takagi, Y. Kiyota, K., Matsuda, Hideki Hatanaka, Kanichi Shimada, Hirofumi Inuyama, Roger Young, Larry F. Bayrante, Oliver T. Jordan, Jesus Reymundo M. Salera, et Francis Edward B. Bayon. 2000. Development and Verification of a Method to Forecast Hot Springs Interference due to Geothermal Power Exploitation. Proceedings World Geothermal Congress 2000. Kyushu - Tohoku, Japon, 28 mai – 10 juin 2000.

International Geothermal Association. 2001. Report of the IGA to the UN Commission on Sustainable Development, Session 9 (CSD-9), New York, avril 2001.

Kagel, A, D. Bates, et K. Gawell. 2005. *Clear the Air: Air Emissions from Geothermal Electric Power Facilities Compared to Fossil-Fuel Power Plants in the United States*. Washington : Geothermal Energy Association, GRC Bulletin, mai/juin.

Kestin, J. (Directeur de publication). Source book on the production of electricity from Geothermal Energy. US Department of Energy. Division of Geothermal Energy. Washington.

Krzan, Zbigniew. 1995. "Environmental Protection of the Tatra, Pieniny and Gorge Mountains by the Use of Geothermal Energy." *WGC* 4: 2799–800.

Lienau, P.J., et Lunis, B.C. (editors), 1991. Geothermal direct use engineering and design guidebook. Geoheat Center, Oregon Institute of Technology.

Lunis, B., et Breckenridge, R. 1991. "Environmental considerations." In Lienau, P.J. and Lunis, B.C., eds., *Geothermal Direct Use, Engineering and Design Guidebook*, 437–45. Klamath Falls, Oregon: Geo-Heat Center.

Organisation mondiale de la santé (OMS), Air Quality Guidelines, Second Edition, Genève, 2000. Disponible à http://www.euro.who.int/air/activities/20050223_3 (consulté le 11 septembre 2006).

Philippines DOE (Department of Energy). 2002. Guidelines for Geothermal Operations in the Philippines. Bureau Circular No. 83-01-02 .Manila. DOE. Disponible à www.doe.gov.ph/peer2005 (consulté en mars 2003).

PNUE (Programme des Nations Unies pour l'environnement). 2005. Guidelines for Geothermal Energy Systems (Release 1.0) Environmental Due Diligences of Renewable Energy Projects, Programme des Nations Unies pour l'environnement. PNUE. Disponible à www.energy-base.org/fileadmin/media/sefi/docs/edd_geothermal.pdf (consulté le 5 novembre 2005).

Reed, Marshall J., et J. Renner. 1995. "Environmental Compatibility of Geothermal Energy." In F.S. Sterret, eds., *Alternative Fuels and the Environment*. Boca Raton: CRC Press.

Takashashi, K, M. Kuragaki, 2000. Yanaizu-Nishiyama geothermal power station H2S Abatement. Proceedings of World Geothermal Congress, Beppu, Japon, 2000. pp. 719-724

Timperly, M.H., et L.F. Hill, (1997). Discharge of mercury from the Wairakei geothermal power station to the Waikato River, New Zealand. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 1997, Vol. 31: 327-336

U.S. DOE (U.S. Department of Energy), 2000. Revised Geothermal Safety and health rules and regulations. Department Circular 2000-02-001. Washington.

U.S. DOE (U.S. Department of Energy), NERL(National Renewable Energy Laboratory). 2001. Geothermal Energy: Heat from the Earth (Publication No. DOE/GO – 102001-1432). Washington : US DOE/NERL. Disponible à <http://www.nrel.gov/dos/fy02osti/29214/pdf> (consulté le 6 décembre 2004).

US DOE (U.S. Department of Energy), Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE). 2004. Geothermal Technologies Program. Geothermal energy Plants. Washington : US DOE/EERE. Disponible à <http://www.eere.gov/geothermal/powerplants.html> (consulté le 6 décembre 2004).

US DOE (U.S. Department of Energy), Geothermal Technologies Program. 2004. Geopowering the West: Hawaii Facts Sheet. 21 décembre 2004. Washington, DC: US DOE. Disponible à http://www.eere.energy.gov/gpw_hawaii.html (consulté en mars 2006).

US DOE (U.S. Department of Energy). 2001. Energy and Geosciences Institute at University of Utah. Geothermal Energy: Clean Sustainable Energy for the Benefit of Humanity and the Environment (Brochure). Washington : US DOE. Disponible à <http://www.geo-energy.org/RedBrochure.pdf> (consulté en octobre 2004).

Utah Water Quality Act. 2004. The Utah Water Quality Act and Title R317 - Environmental Quality and Water Quality, 2004. State of Utah.

Weres, O. 1984. Environmental Protection and the Chemistry of Geothermal Fluids. Berkley, CA.: Lawrence Berkeley Laboratory, LBL 14403.

Wright, P.M. 1998. The Sustainability of Production from Geothermal Resources. Bulletin. Geo-Heat Center 19(2): 9–12.

Annexe A - Description générale des activités

La production d'électricité géothermique implique le captage de réservoirs souterrains d'eaux ou de vapeurs géothermiques qui ont des températures élevées et la transformation de l'énergie thermique en électricité. Les centrales géothermiques sont généralement situées à côté des sources d'énergie thermique, dans le but de réduire les pertes de chaleur occasionnées par le transport. Il est cependant possible de transmettre et de distribuer l'électricité sur de longues distances, en utilisant des lignes électriques dimensionnées de manière adéquate. Les centrales géothermiques requièrent généralement entre 0,5 et 3,5 hectares de terrain par mégawatt (MW). Les systèmes géothermiques intégrés produisent de l'électricité et peuvent utiliser la chaleur résiduelle en provenance des fluides géothermiques rejetés, dans le cadre de diverses industries potentielles à l'aval parmi lesquelles on peut citer les serres, l'aquaculture, le chauffage des locaux, la transformation des aliments/fruits, les activités récréatives des hôtels/centres de mise en forme, entre autres exemples.¹⁸

Les composantes principales des centrales thermiques englobent les puits pour avoir accès à la vapeur et aux eaux souterraines surchauffées, les turbines à vapeur, les générateurs, les condenseurs, les tours de refroidissement, les pompes de réinjection et le matériel électrique des réseaux d'interconnexion.

Les projets d'électricité géothermique impliquent trois étapes principales, à savoir : l'exploration et l'évaluation du réservoir, la mise en place du champ de production et la construction de la centrale.

Les activités d'exploration et d'évaluation des réservoirs englobent les études géologiques, géophysiques et de forage pour les forages d'exploration, et les tests sur les réservoirs.

La mise en place des champs de production comprend le forage des puits de production de vapeur ou d'eau chaude et des puits de réinjection, et la transformation de l'extrant du réservoir pour son utilisation dans la centrale électrique. Le forage se poursuit pendant toute la durée de vie du projet, étant donné que les puits de production et d'injection doivent être périodiquement réévalués pour répondre aux nouvelles exigences en matière de production d'électricité.

Les activités de construction des centrales électriques consistent en la construction de la centrale électrique et des infrastructures connexes, notamment les tours de refroidissement, les conduites et les installations pour le traitement et la réinjection des eaux usées et des gaz. Les autres activités comprennent la mise en place de bassins de décantation pour appuyer le forage et les tests sur les puits, et la construction des routes d'accès, des parcs de stockage et des installations de maintenance.

Les activités d'exploitation comportent l'exploitation et la maintenance routinières de la centrale géothermique, les activités de surveillance et de maintenance des champs de puits, le forage périodique des puits de production et d'injection, la transformation des fluides géothermiques et la maintenance des conduites.

Les fluides géothermiques surchauffés contiennent généralement un certain nombre de métaux et de gaz dissous. Les effluents d'eaux usées et les gaz sont généralement réinjectés dans les réservoirs ou dans leur périphérie pour

¹⁸ Lienau and Lunis (1991)

minimiser le potentiel de contamination des eaux souterraines. La construction de bassins de décantation/refroidissement couverts pour capturer et purifier les gaz est parfois nécessaire dans les contextes où la réinjection des fluides d'eaux usées et des gaz n'est pas possible.

En fonction de la conception de l'établissement, les tours de refroidissement peuvent utiliser des fluides géothermiques ou emprunter des sources d'eaux de surface pour la circulation. Les précipités de soufre à l'intérieur des condensats risquent de produire des déchets solides dangereux qui doivent être retirés et stockés sur le site de manière appropriée avant d'être éliminés.

Il existe deux principaux types de ressources géothermiques : la vapeur sèche et l'eau chaude¹⁹. Dans le cas des ressources en vapeur sèche, l'extractant des puits de production est une vapeur sèche qui peut être utilisée directement pour faire fonctionner les turbogénératerices, tandis que dans le cas des ressources en eau chaude, le rejet du puits est une eau à haute température (>180 °C). Pour les ressources en eau dont la température est inférieure à 180°C, la production d'électricité est possible en utilisant un système à cycle binaire impliquant l'utilisation d'un fluide secondaire qui est présenté ci-après.

Les projets de production d'électricité géothermique impliquent généralement un des procédés ou une combinaison des procédés suivantes :

- **Procédé de la vapeur flash géothermique** : la vapeur est séparée de la ressource en eau chaude et utilisée comme électricité lorsque la température de la ressource est supérieure à 180°C, ce qui permet d'extraire une partie de la vapeur à haute pression par le biais du « flashing », dans des séparateurs de vapeur, pour faire fonctionner la turbogénérateuse. Le flashing simple, le flashing double et,

occasionnellement, le flashing triple sont des technologies courantes. La portion constituée par la vapeur est utilisée dans les turbines et l'eau chaude restante est rejetée ou réinjectée dans le réservoir.

- **Procédé géothermique binaire** : Lorsque la température de la ressource est inférieure à 180°C, un second cycle utilisant un fluide à point d'ébullition peu élevé comme l'isobutène, l'isopentane ou un mélange ammoniaque-eau, est utilisé comme interface entre la source de chaleur (fluides géothermiques) et la turbine.
- **Procédé géothermique combiné flash/binaire** : Le procédé flash et le procédé binaire sont tous deux utilisés pour accroître l'efficacité.
- **Procédé géothermique à vapeur sèche** : La vapeur sèche à haute pression rejetée par les puits de production est utilisée directement dans les turbines pour générer de l'électricité. Les ressources de vapeur sèche sont très précieuses mais relativement rares.

¹⁹ Duffield and Sass (2003)