



swissi

Rapport selon OPAM

Géothermie profonde Haute-Sorne



Entreprise	Geo Energie Suisse
Numéro de projet	5100371
Objet	Projet-Pilote Géothermie Haute-Sorne
Geo Energie Suisse	Monsieur Peter Meier, directeur Monsieur Olivier Zingg, représentant pour le projet
Conseiller de Swissi SA	Dr Jean-Marc Vaucher
Conseillers de SwissiPS Tüv Süd	Monsieur Pablo Lerena Monsieur Serge Forestier
ESCO Conseil Sàrl	Monsieur Régis Kottelat
Lieu et date	Neuchâtel, le 11 juillet 2014/VA/ds / version finale

Table des matières

1	Table des modifications du document	5
2	Abréviations et définitions	6
3	Introduction [1]	8
4	Description de l'entreprise et de son voisinage	9
4.1	Données générales [1,2]	9
4.2	Activité de l'entreprise [1]	10
4.3	Description de l'aire de l'entreprise [1,2]	10
4.4	Description du voisinage de l'entreprise [1,2]	12
4.5	Assurances [1]	14
4.6	Engagement pour la sécurité [1,2]	14
5	Matières dangereuses	15
6	Traitement des eaux	16
6.1	Eaux usées et eaux claires [2]	16
6.2	Eaux d'extinction et de rabattement [2]	16
7	Traitement des effluents gazeux [2]	17
8	Bruit, rayonnement ionisants et non ionisants	17
9	Dangers externes à l'entreprise	17
9.1	Liste des dangers [3]	17
9.2	Risque d'inondation	19
9.3	Risque sismique	21
10	Mesures de sécurité [2]	22
10.1	Mesures constructives	22
10.1.1	Accès au site	22
10.1.2	Construction du bâtiment	22
10.1.3	Voies de fuite	24
10.1.4	Rétention des eaux d'extinction	25
10.1.5	Réservoir d'hydrocarbure [1]	25
10.1.6	Aéroréfrigérateurs [1]	25
10.1.7	Caves de forage	26
10.2	Mesures techniques	26
10.2.1	Détection incendie et de gaz inflammables [2]	26
10.2.2	Réservoir d'hydrocarbure [1]	26
10.2.3	ORC [1]	27
10.2.4	Ventilation [2]	27
10.2.5	Protection foudre [2]	28
10.3	Mesures organisationnelles	28

10.3.1	Gestion des visiteurs	28
10.3.2	Utilisation des substances dangereuses [1]	28
10.3.3	Gestion des déchets spéciaux	29
10.3.4	Autres mesures	29
11	Analyse de risque liée au fluide caloporteur [8]	30
11.1	Description de la méthode d'analyse	30
11.2	Propriétés des substances	32
11.2.1	Propriétés physico-chimiques [12,13]	32
11.2.2	Physiologie-toxicologie [10]	33
11.2.3	Compatibilités avec les matériaux	33
11.2.4	Comportement des substances concernées dans l'environnement	33
11.2.5	Toxicité pour les organismes aquatiques	33
11.3	Approvisionnement et stockage	34
11.4	Identification des dangers	34
11.4.1	Rupture catastrophique de la citerne de propane liquéfié	35
11.4.2	Fuite continue d'une conduite suite à la rupture catastrophique d'une pompe	35
11.4.3	Fuite continue au niveau de la citerne de stockage	36
11.5	Description des scénarios	37
11.5.1	Arbre des causes [9]	37
11.5.2	Justification des valeurs numérique des fréquences présentées dans les arbres des causes	40
11.5.3	Arbre des conséquences [7]	42
11.5.4	Justification de la valeur des probabilités d'événements	47
11.6	Modélisation des conséquences des scénarios d'accident	47
11.6.1	Rupture catastrophique de la citerne de 50m ³	47
11.6.2	Cas 1, fuite continue sur une conduite de la pompe ou la citerne, conséquences	47
11.6.3	Cas 2, conduite de remplissage de la citerne, conséquences	52
11.6.4	Courbes cumulatives	56
11.7	Conclusion de l'analyse de risques	58
11.8	Données complémentaires	60
11.8.1	Risque sismique	60
11.8.2	Débit de fuite	61
11.8.3	Spray release	62
11.8.4	Equivalents TNT, détonation	63
11.8.5	Victimes dues aux fragments de vitres	64
11.8.6	Déflagration dans le local des pompes	65
11.8.7	Victimes dues aux fragments de vitres	66
11.8.8	Débit de fuite	67
11.8.9	Spray release	68
11.8.10	Rose des vents de St-Ursanne	69
11.8.11	Dispersion atmosphérique	69
11.8.12	Explosion multi énergie	71
11.8.13	Victimes par fragments de vitres	73
12	Conclusions	74

13	Bibliographie	76
Annexe 1	Plan du site	75
Annexe 2	Plan technique du bâtiment	76
Annexe 3	Représentation des façades	77
Annexe 4	Plan des canalisations	78
Annexe 5	Schéma de l'installation ORC	79
Annexe 6	Occupation rail et route	80

1 Table des modifications du document

Date	Auteur	Modification
07.07.2014	JM Vaucher - Swissi SA	1 ^{er} document
09.07.2014	JM Vaucher - Swissi SA	compléments de GES et ESCO

2 Abréviations et définitions

Abréviation	Définition	Remarque
AEAI	Association des Etablissements cantonaux d'Assurance Incendie	normes et directives suisses de la protection incendie
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion	vaporisation explosive d'un liquide surchauffé (gaz liquéfiés sous pression p.ex.)
CCE	Conférence des Chefs des services de la protection de l'environnement	
CFF	Chemins de Fer Fédéraux	
CFST	Commission fédérale de coordination pour la sécurité au travail	
ENV	Service de l'ENVironnement	Service cantonal jurassien
FDS	Fiche de données de sécurité	Description complète d'un produit chimique sous ses divers aspects, physique, chimique, toxicologique, environnemental, ...
IAM	Indice d'Accident Majeur	<0.3 accident 0.3-0.5 gros accident >0.5 accident majeur
LII	Limite Inférieure d'Inflammabilité	Concentration de vapeur inflammable dans l'air en dessous de laquelle l'inflammation n'est pas possible
LSI	Limite Supérieure d'Inflammabilité	Concentration de vapeur inflammable dans l'air en dessus de laquelle l'inflammation n'est plus possible
Mesures constructives	Mesures de sécurité liées à la construction	exemples : murs coupe-feu, rétention fixe, ...
Mesures organisationnelles	Mesures de sécurité	exemples : procédures, concepts, kit d'absorption, ...
Mesures techniques	Mesures de sécurité	exemples : détection incendie ou de gaz, ventilation, asservissements, rétention mobile, ...
OFEV	Office Fédéral de l'Environnement	
OFSP	Office Fédéral de la Santé Publique	
OmoD	Ordonnance sur les mouvements de déchets spéciaux	RS 814.610
OPAir	Ordonnance sur la protection de l'air	RS 814.318.142.1
OPAM	Ordonnance de protection sur les accidents majeurs	RS 814.012
ORC	Organic Rankine Cycle	cycle thermodynamique endoréversible faisant appel à un fluide caloporteur organique
ORaP	Ordonnance sur la radioprotection	RS 814.501

ORNI	Ordonnance sur la protection contre les rayonnements non ionisants	RS 814.710
OSPEX	Ordonnance sur les appareils et les systèmes de protection destinés à être utilisés en atmosphères explosibles	RS 734.6
P	probabilité (événements/an)	
ppm	partie par million	dans ce rapport, il s'agit de d'un rapport volume/volume
QHSE	qualité, hygiène, sécurité, environnement	
RC	responsabilité civile	
RCJU	République et Canton du Jura	
SAT	Service de l'Aménagement du Territoire	service cantonal jurassien
SEI	seuil d'effets irréversibles	
SEL	seuils d'effets létaux	
Seuil OPAM	valeur quantitative à partir de laquelle une substance est soumise à l'OPAM	
SOP	Standard Operating Procedure	procédure de travail normale
SP	sapeurs-pompiers	
SPE	sapeurs-pompiers d'entreprise	
SUVA	caisse nationale d'assurance	

3 Introduction [1]

La société Geo-Energie Suisse SA, sise à Zurich, prévoit sur la commune de Haute-Sorne la construction d'une centrale géothermique pour la production d'électricité et de chaleur, à l'aide de la technique des systèmes géothermiques stimulés (« Enhanced Geothermal Systems » (EGS)). Les sept actionnaires de Geo-Energie Suisse SA se sont regroupés pour promouvoir l'exploitation du grand potentiel de la géothermie profonde et lancer cette technologie sur le marché. Le projet est conçu sous forme d'un projet pilote et de démonstration, et doit apporter la preuve de sa faisabilité technique.

Le calendrier actuel suppose l'obtention d'un permis de construire valable pour l'ensemble du projet au premier semestre 2015 (forages et installations de surface). Le premier des deux forages nécessaires à l'extraction de la chaleur est prévu en 2016 et le second forage en 2017. La construction des installations de surface est prévue en 2018. Son exploitation devrait débuter en 2020.

Le rapport OPAM présent est élaboré dans le cadre de l'étude d'impact sur l'environnement et en fonction du dépassement des seuils OPAM pour les fluides caloporteurs envisagés. Le canton du Jura au travers de l'Office de l'Environnement confirme la nécessité de la présente étude de risques.

Ce rapport concerne les installations de valorisation de la chaleur uniquement. Les risques liés aux forages géothermiques ou à la sismicité ne concernent pas directement l'Ordonnance sur les accidents majeurs ; ils sont par conséquent étudiés en détail dans des documents spécifiques faisant partie du rapport d'impact sur l'environnement.

A ce stade de la planification des installations, de nombreux détails techniques ne sont pas connus, notamment en ce qui concerne l'ORC (Organic Rankine Cycle), qui est au cœur de la transformation de la chaleur géothermale en électricité et qui pourra contenir une quantité d'hydrocarbure supérieure au seuil OPAM correspondant.

En accord avec l'Office de l'Environnement (ENV), ce rapport devra être mis à jour lorsque l'avancement du projet le permettra, mais au plus tard avant le début de l'exploitation de la centrale géothermique.

4 Description de l'entreprise et de son voisinage

4.1 Données générales [1,2]

Nom de l'entreprise :	Geo-Energie Suisse AG
Siège de la société :	Reitergasse 11, 8004 Zurich / +41 (0)61 500 07 20
Bâtiment :	Projet-Pilote Géothermie Haute-Sorne
Surface au sol :	~18'000 m ²
Nombre d'employés :	maximum 5
Responsable du site :	Peter Meier, directeur
Adresse :	Route de la Raisse, 2855 Glovelier (Commune de Haute-Sorne)
Coordonnées :	47° 20' 0.078" N 7° 13' 14.167" E (47.333355,7.220602) 583'520 / 242'522 Altitude = ~493 m
Parcelles :	2136, 2137, 2138
Personnes de contact : (auteurs du rapport)	Jean-Marc Vaucher, chimiste, Swissi SA Jean-marc.vaucher@swissi.ch / +41 (0)79 240 69 79 Régis Kottelat, Ing. Chimiste dipl., ESCO Conseil Sàrl r.kottelat@esco-conseil.ch / +41 (0)76 822 27 41

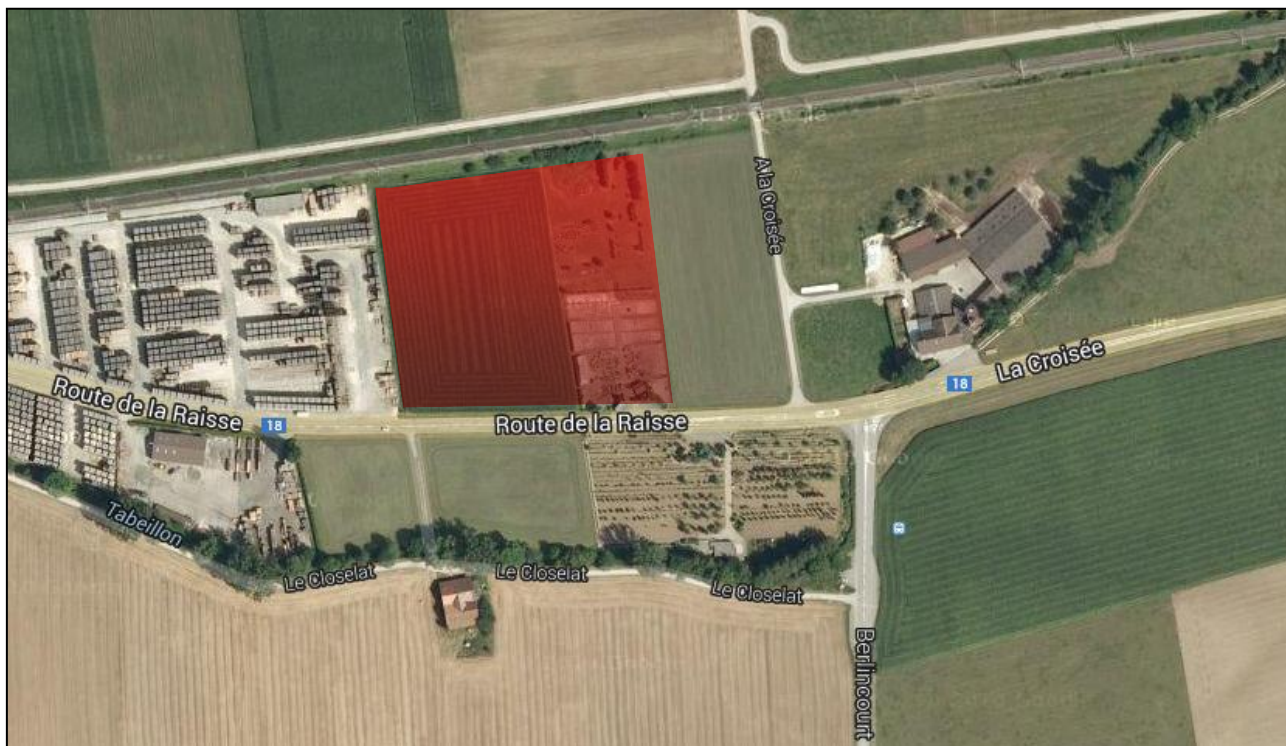


Figure 1 : plan général d'implantation du complexe géothermique (zone concernée en rouge)

4.2 Activité de l'entreprise [1]

La géothermie profonde jouit en Suisse du plus grand potentiel théorique parmi les nouvelles énergies renouvelables indigènes non-émettrices de CO₂. Geo-Energie Suisse SA est une société issue du projet de plusieurs fournisseurs d'énergie suisses qui se sont engagés à contribuer au développement de la géothermie profonde pour la production d'électricité et de chaleur en Suisse. Geo-Energie Suisse souhaite mener à bien le premier projet de ce type en Suisse d'ici 2019. L'originalité du projet ainsi que les défis technologiques et économiques concernent principalement le forage ; cette partie ne concerne pas l'OPAM à proprement parler, car les substances chimiques qui seront utilisées lors du forage ne dépasseront pas leur seuil OPAM. Les techniques liées aux installations de conversion de la chaleur géothermique et électricité sont par contre maîtrisées et améliorées depuis plusieurs décennies maintenant. C'est ce dernier aspect qui est soumis à l'OPAM.

Le projet de la Haute-Sorne devrait fournir au maximum 5 MW électriques.

Le calendrier estimatif pour la construction de cette centrale géothermique pilote est le suivant :

- Début 2015 : obtention du permis de construire pour l'ensemble du projet (forage et installations de surface)
- 2016 : premier forage géothermique
- 2017 : en cas de succès, deuxième forage géothermique
- 2018 : en cas de succès, construction des installations de valorisation de la chaleur
- 2020 : début de l'exploitation.

4.3 Description de l'aire de l'entreprise [1,2]

Aménagements extérieurs, infrastructures

Le site sera protégé par un grillage contre les intrusions (c.f. plan du site, annexe 1).

Activités de base

Exploitation d'un doublet géothermique profond pour la production d'électricité. Transformation de la chaleur géothermique en électricité en utilisant un fluide caloporteur (propane, isobutane ou isopentane).

Répartition de locaux

Le plan technique des locaux figure en annexe 2. La façade Est au niveau des locaux techniques sera entièrement constituée de lamelles. Les façades Est et Ouest seront constituées de lamelles jusqu'à une hauteur d'environ 2.8 mètres, respectivement 8.5 mètres (c.f. annexe 3).

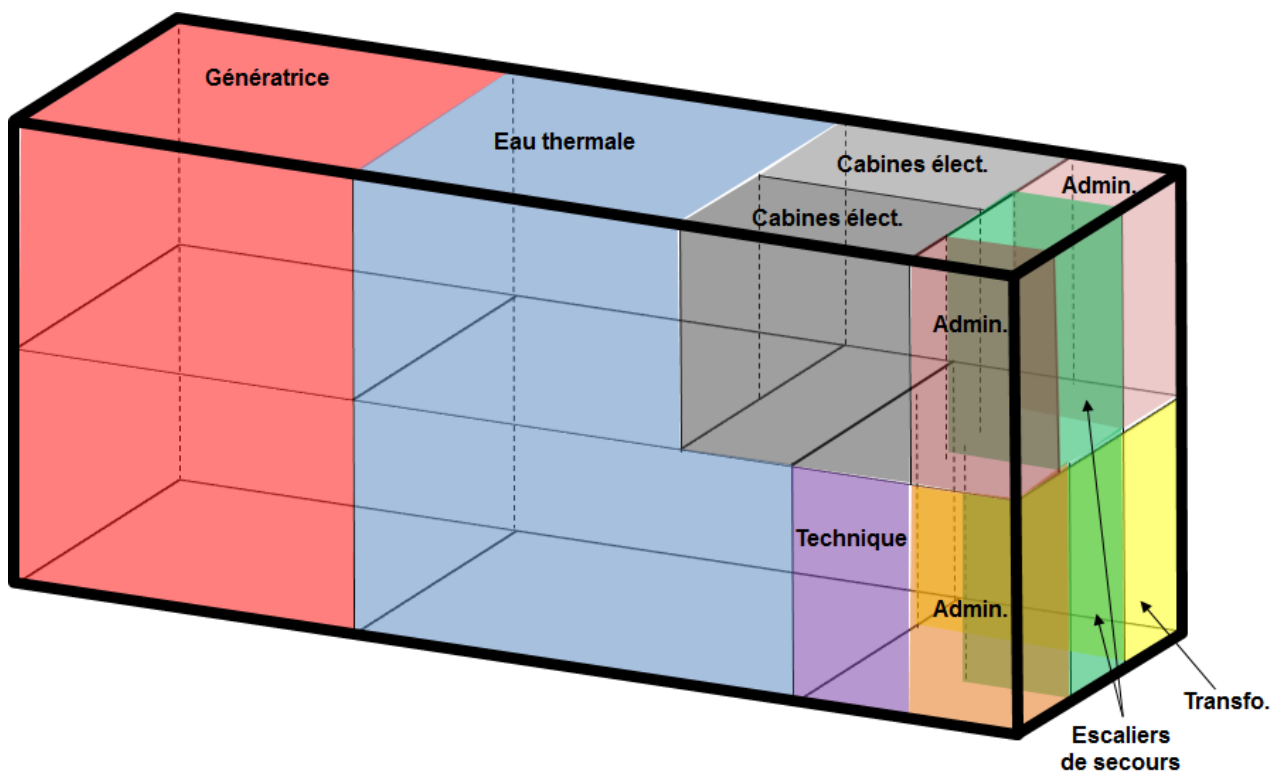


Figure 2 : bâtiment de production (nord à gauche, ouest en bas)

Stockage des substances

Un réservoir de 50 m³, d'un diamètre d'environ 2.5 m pour une longueur de 10 m, permettra le stockage temporaire du fluide caloporteur lors des opérations d'entretien de l'ORC. La quantité maximale présente dans ce réservoir sera au maximum de 28 tonnes pour l'isobutane ou le propane. Ce réservoir se trouvera à l'air libre, recouvert d'une couche de terre de 80 cm afin d'assurer une protection thermique et mécanique. La position du réservoir figure sur le plan du site en annexe 1. On considère que les périodes de maintenance représenteront 5% du temps d'exploitation des installations, et donc que le réservoir contiendra des quantités significatives d'hydrocarbures uniquement durant ce temps-là.

Des quantités d'huiles très inférieures au seuil OPAM seront présentes dans un local selon les principes de stockage applicables.

Définition des compartiments coupe-feu et des zones ATEX

Les compartiments coupe-feu suivants seront créés, conformément aux exigences de l'ECA Jura :

- Traitement de l'eau thermique
- Salle de stockage et atelier
- Local des transformateurs
- Salle pour les présentations
- Local basse tension
- Local moyenne tension.

Les fonds, parois et plafonds seront en matériaux incombustibles, EI 30 à EI 90 selon les prescriptions applicables et les recommandations de l'ECA. Les portes seront EI 30 [2].

Les zones ATEX seront définies dans le document ATEX qui sera un document complémentaires lorsque l'installation sera clairement définie.

4.4 Description du voisinage de l'entreprise [1,2]

Le site (en rouge) est bordé par :

- Nord : voie CFF Delémont - Porrentruy (noir)
- Est : ferme, exploitation agricole (vert)
- Sud : route principale Bassecourt - Glovelier (gris)
- Ouest : scierie industrielle (jaune).



Figure 3 : voisinage du site

Il n'y a pas d'entreprise classée OPAM dans la zone proche du site, l'OPAM route et chemin de fer s'applique.

Lieux avec des personnes à l'intérieur

Scierie Röthlisberger – il n'y a à proximité du site que du bois stocké, les locaux de travail se situent plus loin.

Ferme (La Croisée), à l'est du site.

Les autres terrains sont principalement en zone agricole.

Voies de communication à proximité

Route cantonale Glovelier – Bassecourt bordant la parcelle au sud, avec un trafic moyen de 3150 véhicules par jour (TJM) en 2010.

Ligne de chemin de fer CFF Porrentruy – Glovelier – Delémont bordant la parcelle au nord. Les statistiques d'occupation du rail sont reportées à l'annexe 6.

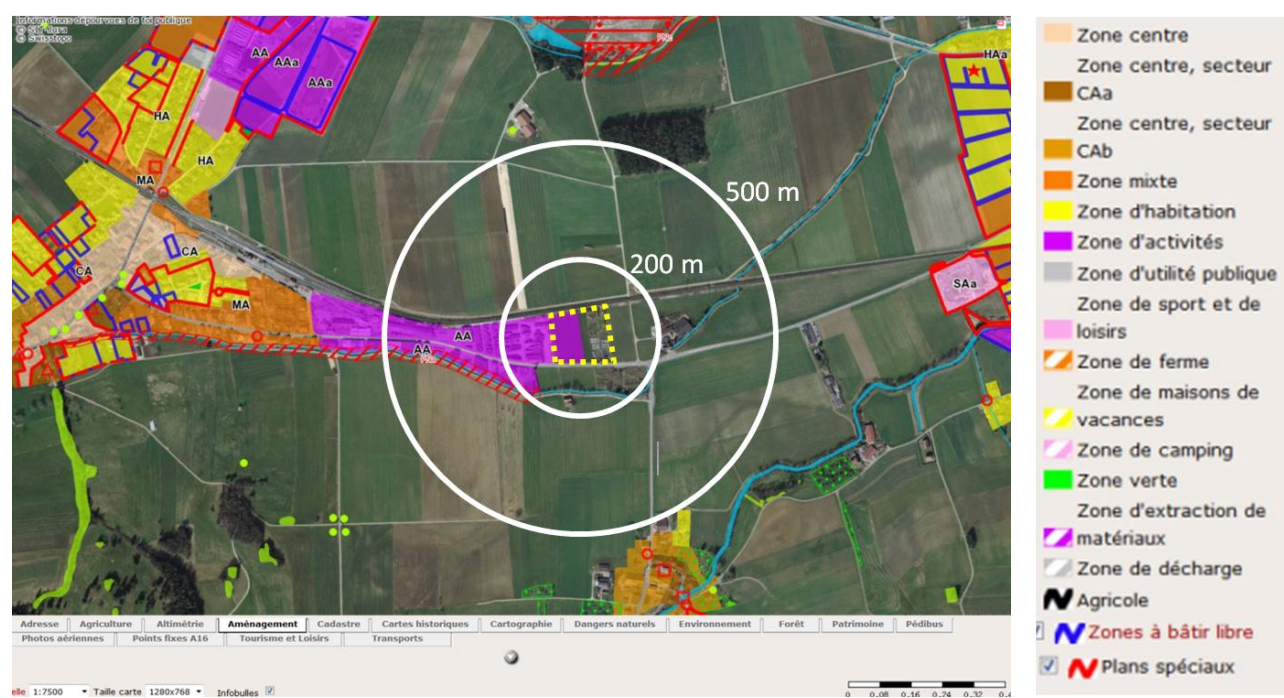


Figure 4 : rayon 200 et 500 m autour de l'entreprise



Figure 5 : vue depuis l'est, de gauche à droite, route cantonale, scierie Röthlisberger, voie CFF

4.5 Assurances [1]

Au niveau de la demande de permis de construire, il est encore trop tôt pour détailler les contrats d'assurance qui seront établis pour la construction et l'exploitation des installations. A ce niveau, Geo-Energie Suisse AG s'engage à contracter les assurances nécessaires pour couvrir les conséquences d'un éventuel accident sur les personnes et les choses.

4.6 Engagement pour la sécurité [1,2]

Geo-Energie Suisse AG souhaite faire de ce projet pilote un exemple en matière de sécurité.

Les cahiers des charges pour les différents fournisseurs et entreprises qui participeront à la construction et à l'équipement des bâtiments incluront comme exigences le respect des normes et directives en vigueur.

Les normes, exigences et/ou directives applicables des organismes suivants seront prises en compte pour la réalisation des bâtiments et des installations de production d'énergie :

- Législation et directives suisse et cantonale, en particulier concernant :
 - la protection de la nature, des eaux, de l'air et du sol,
 - la protection des travailleurs,
 - les mesures de protection contre les explosions et la sécurité des machines (OSPEX)
- SIA (construction)
- AEAI (protection incendie)
- SUVA (2135) et CFST (protection des travailleurs)
- SN / EN (dont NF EN 378-2), ASIT (notamment pour les installations de production d'énergie)
- CCE, TRCI (entreposage des liquides, protection contre les crues, règles de la technique).

Une formation poussée et suivie des collaborateurs sera effectuée par un organisme spécialisé (à définir ultérieurement).

5 Matières dangereuses

Les matières dangereuses sont les suivantes:

- Fluide caloporteur : propane, isobutane, isopentane (seuil OPAM atteint)
- Huiles (seuil OPAM non atteint)
- Autres produits dangereux divers tels que produits d'entretien, ... (seuil OPAM non atteint)
- Déchets spéciaux (seuil OPAM non atteint).

Au stade de la demande de permis de construire, le choix du fluide caloporteur n'a pas été fait de manière définitive. Les trois hydrocarbures à considérer sont [1] :




Désignation	Quantité max (kg)	Seuil quantitatif SQ (kg)	Classification EU / SGH	Remarques
Propane CAS 74-98-6	30'000 – 50'000	20'000	EU : F ⁺ , R12 SGH :  H220 – 280	<ul style="list-style-type: none"> • Synonyme : R290 • SQ imposé par rapport au critère « inflammabilité »
Isobutane CAS 75-28-5	30'000 – 50'000	20'000	EU : F ⁺ , R12 SGH :  H220 – 280	<ul style="list-style-type: none"> • Synonymes : 1-méthylpropane, R600a • SQ imposé par rapport au critère « inflammabilité »
Isopentane CAS 78-78-4	30'000 – 50'000	2'000	EU : F ⁺ , X _n , N, R12-65-66-67-51/53 SGH :  H224 – 304 – 336 – 411, EUH066	<ul style="list-style-type: none"> • Synonyme : 1-méthylbutane • SQ imposé par rapport au critère « écotoxicité »

Tableau 1 : données de base fluides caloporteurs

H220 :	Gaz extrêmement inflammable
H224 :	Liquide et vapeurs extrêmement inflammables
H280 :	Contient un gaz sous pression ; peut exploser sous l'effet de la chaleur
H304 :	Peut être mortel en cas d'ingestion et de pénétration dans les voies respiratoires
H336 :	Toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme
EUH066 :	L'exposition répétée peut provoquer dessèchement ou gerçures de la peau

6 Traitement des eaux

6.1 Eaux usées et eaux claires [2]

Les eaux sont séparées en 3 catégories présentées dans le tableau suivant.

Types d'eaux	Eaux usées industrielles (EUI) En provenance de la production, Volume approximatif : < 10 m ³ /an (condensat) <i>Traitement</i> - évacuation comme eaux usées Eaux usées et eaux usées sanitaires (EU) Eau en provenance des sanitaires, éviers, ... Volume approximatif : ~ 100 m ³ /an <i>Traitement</i> - évacuation par réseau en STEP Eaux claires pluviales (EC) Eau provenant de la toiture, drainages, ruissellement, ... - évacuation par le réseau d'eaux claires, via bassin de rétention.
Evacuation des eaux	EUI : avec EU EU : STEP Soyhières EC : Tabeillon
Rétention des eaux d'extinction	Local générateur : minimum 60 m ³ Local eau thermique : minimum 45 m ³ Aéroréfrigérant : minimum 112 m ³ Bassin des eaux météoritiques : maximum 420 m ³
Plan des canalisations	c.f. annexe 4

6.2 Eaux d'extinction et de rabattement [2]

Le volume prévu des eaux d'extinction est le suivant :

- 1-2 canons utilisés en protection à 1200 l/min
- 5 lances en extinction (avec ou sans émulsifiant) à 300 l/min.

Volume total par heure : 162-234 m³/h ; autonomie de la rétention (si bassin de rétention des eaux météoritiques plein à 50% - 325 m³) 120-80'.

7 Traitement des effluents gazeux [2]

L'utilisation de l'hydrocarbure en tant que fluide caloporteur se fera en circuit fermé (c.f. annexe 5). Avant la mise en route de l'installation, le fluide caloporteur sera introduit dans l'installation par une entreprise spécialisée. Le remplissage et la mise en route d'une installation de ce type est courante. Sauf en cas de fuite accidentelle, il n'y aura pas de perte ou de consommation d'hydrocarbure.

L'élimination de l'hydrocarbure, si elle doit se faire, sera effectuée par une entreprise spécialisée conformément à l'état de la technique au moment de l'opération.

Pas d'autres effluents gazeux notables.

8 Bruit, rayonnement ionisants et non ionisants

L'installation respectera les normes en vigueur.

Aucune utilisation de rayonnements ionisants.

Aucune utilisation de rayonnements non ionisants.

9 Dangers externes à l'entreprise

9.1 Liste des dangers [3]

Dangers naturels	Probabilité	Conséquences
1. tremblement de terre	faible	importantes
2. mouvement géologique	nulle	importantes
3. avalanche	nulle	très faible
4. précipitations violentes	moyenne	faible
5. crues inondations	moyenne	faible
6. ouragans, tempête	faible	faible
7. vagues de froid	moyenne	faible
8. sécheresse, vagues de chaleur	moyenne	faible
9. pullulation d'espèces	faible	aucun
10. épizooties	faible	aucun
11. épidémies, pandémies	faible	faible

Dangers techniques	Probabilité	Conséquences
12. rupture de barrage	nulle	aucun
13. élévation de la radioactivité	faible	faible
14. accident dans des installations stationnaires OPAM	faible	pas d'installation OPAM dans un rayon tel que l'effet domino serait possible
15.1. transport de matières dangereuses par route	faible	nuage toxique, BLEVE, très proche du bâtiment, effet domino possible
15.2. transport de matières dangereuses par rail	faible	nuage toxique, BLEVE, à distance du bâtiment, effet domino possible
16. accidents d'avion	très faible	impact direct sur le bâtiment, incendie, dégâts sur les capacités de produits dangereux
17. accidents routiers de grande ampleur	faible	difficulté d'accès, saturation des services de secours
18. accidents ferroviaire	faible	difficulté d'accès, saturation des services de secours
19. accidents lacustre	néant	aucun
20. grands incendies	faible	extension de l'incendie au bâtiment
21.1. pannes réseaux électriques	moyen	perte de production, arrêt des systèmes de sécurité au-delà de la durée des batteries
21.2. pannes de réseaux de gaz	faible	aucun
21.3. pannes de systèmes d'informations	moyen	problème de communication en cas d'accident ou de crise
22. intoxication de masse	faible	faible

Dangers de sociétés	Probabilité	Conséquences
23. violences infra guerrières	faible	dangers pour les installations et la survie de l'entreprise
24. violences sociales	faible	dangers pour les installations et la survie de l'entreprise
25. grandes manifestations	faible	dangers pour les installations
26. crises d'approvisionnement énergétique	faible	faible

Parmi l'ensemble des scénarii, les suivants présentent un danger particulier :

4 -5 : ces dangers sont pris en compte

15.1 et 15.2 : en cas de BLEVE proche, les canalisations et les aéro refroidisseurs peuvent être touchés ; dans ce cas, les dégâts dus au BLEVE sont prépondérants, un BLEVE ou un UVCE subséquent ne peut être exclu.

Les dangers 15.1 et 15.2 sont relevés, mais en cas de survenance, les dégâts seront d'abord et principalement dus à ces explosions primaires. Une explosion subséquente dans l'ORC ne représente pas un accroissement notable des dégâts.

9.2 Risque d'inondation

Les dangers naturels qui touchent les parcelles de la zone prévue pour l'implantation de la centrale géothermique à Glovelier sont uniquement des dangers crues en provenance du ruisseau du Tabeillon. La carte de dangers crues « Haute Sorne B et C », établie en décembre 2011, présente la situation à Glovelier. Le site se trouve au milieu d'une zone de danger moyen, dessinée en bleu, du fait de débordements pour des crues de fréquence élevée et d'intensités qui restent faibles, c'est-à-dire avec une hauteur d'eau $h < 0.5$ m ou un produit de la vitesse par la hauteur d'eau $v \times h < 0.5$ m²/s. Le point faible au niveau du Tabeillon se situe en amont de la scierie Röthlisberger.

Pour la phase d'exploitation, le concept de protection consiste à placer le bâtiment et les installations sensibles à la hauteur de sécurité $H_{300 \text{ ans}}$. Pour le point le plus sensible de la zone de projet, cette cote est de 494.60 m. Les eaux d'inondation en provenance de l'entreprise Röthlisberger se répartiront donc en trois couloirs entre les objets surélevés, un premier longeant la voie de chemin de fer, un autre entre le bâtiment et la plate-forme et un dernier entre la plate-forme et la route. Plus d'informations figurent dans le rapport d'impact sur l'environnement du projet.

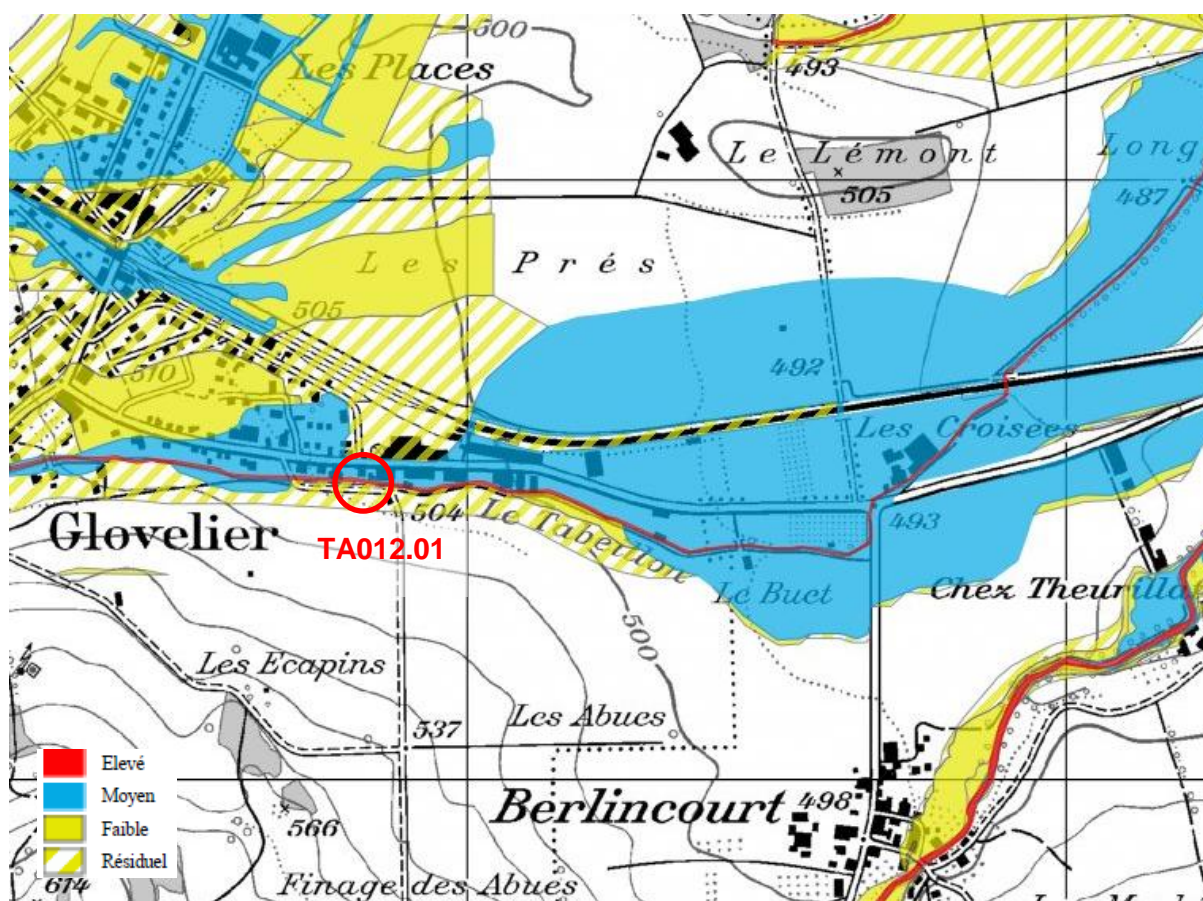


Figure 6 : carte des dangers naturels. Le point faible (TA012.01) se situe en amont de la scierie Röthlisberger et du site retenu pour le projet

Le site se situe en secteur Au (carte secteurs protection des eaux ci-après). Il n'y a par contre pas de puits communaux exploités en aval hydraulique proche du site. Le sous-sol et les eaux souterraines contiennent des concentrations non négligeables de HAP provenant des entreprises en amont hydraulique.



Figure 7 : secteurs de protection des eaux pour le site et en aval hydraulique. La zone en rouge indique les secteurs Au. Il n'y a pas de secteurs S1, S2 ou S3 en aval direct du site. Le site est entouré en blanc. Source : géoportail cantonal.

Au niveau des cours d'eau, le Tabeillon coule au sud et à l'est du site (Figure 1 et Figure 4), qui traverse toute la zone agricole en direction de Bassecourt, longe ce village à son extrémité nord puis se jette dans la Sorne, soit à environ 2.9 km en aval du site.

9.3 Risque sismique

L'étude de risque sismique menée dans le cadre de l'étude d'impact sur l'environnement montre que le risque lié à la sismicité induite durant l'exploitation est nettement inférieur à ce qu'il était durant la stimulation, un état de circulation stationnaire étant atteint. Or, la centrale géothermique ne sera réalisée qu'en cas de stimulation réussie et n'ayant donc pas causé de dommages aux bâtiments les plus sensibles.

La réussite de la stimulation implique que la présence de failles importantes au niveau du réservoir et susceptibles d'induire des tremblements de terre causant des dommages a pu être exclue. De plus, le réseau de surveillance sismique sera maintenu en activité durant toute la durée de l'exploitation et permettra ainsi de réagir dans le cas où l'extension de la contraction thermique devait induire une augmentation de la sismicité induite sur des failles encore inconnues situées au-delà du réservoir.

Ces considérations mènent à conclure que durant l'exploitation, le risque de dommages causés par la sismicité naturelle redevient prépondérant par rapport au risque lié à la sismicité induite.

Concernant la construction parasismique, les normes SIA 261 et suivantes s'appliquent [14]. Le canton du Jura est classé en zone 1, soit de faible aléa sismique [15]. Selon la norme SIA 261, si la construction respecte cette norme, alors le risque sismique n'est pas considéré dans le cadre de l'OPAM. Le respect de cette norme est une condition contraignante à la réalisation de ce projet.

Une pratique similaire est appliquée en Allemagne. Pour référence, la prise en compte de la construction parasismique dans l'industrie chimique selon les normes allemandes DIN 4149 et DIN EN 1998-1 est décrite dans les documents référencés [17 et 18]. A titre d'exemple, une expertise parasismique selon les normes allemandes d'une installation contenant des substances dangereuses est référencée [16].

10 Mesures de sécurité [2]

Au moment de la demande de permis de construire, les exigences de l'Office de l'Environnement et de l'ECA Jura sont claires. Le Service des arts et métiers et du travail pourra encore amener des modifications au dossier dans le cadre de la demande de permis d'exploitation. Ce chapitre pourra donc être mis à jour ultérieurement si nécessaire.

10.1 Mesures constructives

10.1.1 Accès au site

L'accès sur le site sera restreint par une clôture complète de la zone. Des mesures organisationnelles restent en suspens quant à la surveillance du site.

10.1.2 Construction du bâtiment

Le bâtiment sera construit selon les normes en vigueur. Notamment, les directives AEAI seront appliquées en matière de compartimentage.

Le compartimentage est réalisé en fonction des affectations des différents locaux [2].

Affectation	Référence directive AEAI	Fond	Parois	Plafond
Rez-de-chaussée				
Halle génératrice	15-03 - art. 3.2.1 15-03 - art. 3.10.1	-	EI30 (icb)	EI30 (icb)
Halle eau thermale	15-03 - art. 3.2.1 15-03 - art. 3.10.1	-	EI30 (icb)	EI30 (icb)
Locaux administratifs et sans affectation à risque élevé	15-03 - art. 3.2.1 15-03 - art. 3.10.1	-	EI30 (icb)	EI30 (icb)
Locaux transformateurs	1003-03 - ad. Art. 10.4	-	EI90 (icb)	EI90 (icb)
Local des huiles jusqu'à 2000 litres (F3-F5)	28-03 - art. 5.2	-	EI30 (icb)	EI30 (icb)
Local des huiles jusqu'à 2000 litres (F3-F5)	28-03 - art. 5.2	-	EI60 (icb)	EI60 (icb)
Cages d'escaliers de secours	16-03 - art. 3.5.1	-	EI60 (icb)	EI60 (icb)
1^{er} étage				
Locaux administratifs et sans affectation à risque élevé	15-03 - art. 3.2.1 15-03 - art. 3.10.1	EI30 (icb)	EI30 (icb)	-
Cages d'escaliers de secours	16-03 - art. 3.5.1	EI60 (icb)	EI60 (icb)	-
Locaux cabines électriques basse et moyenne tension	1003-03 - ad. Art. 10.4	EI60 (icb)	EI60 (icb)	-

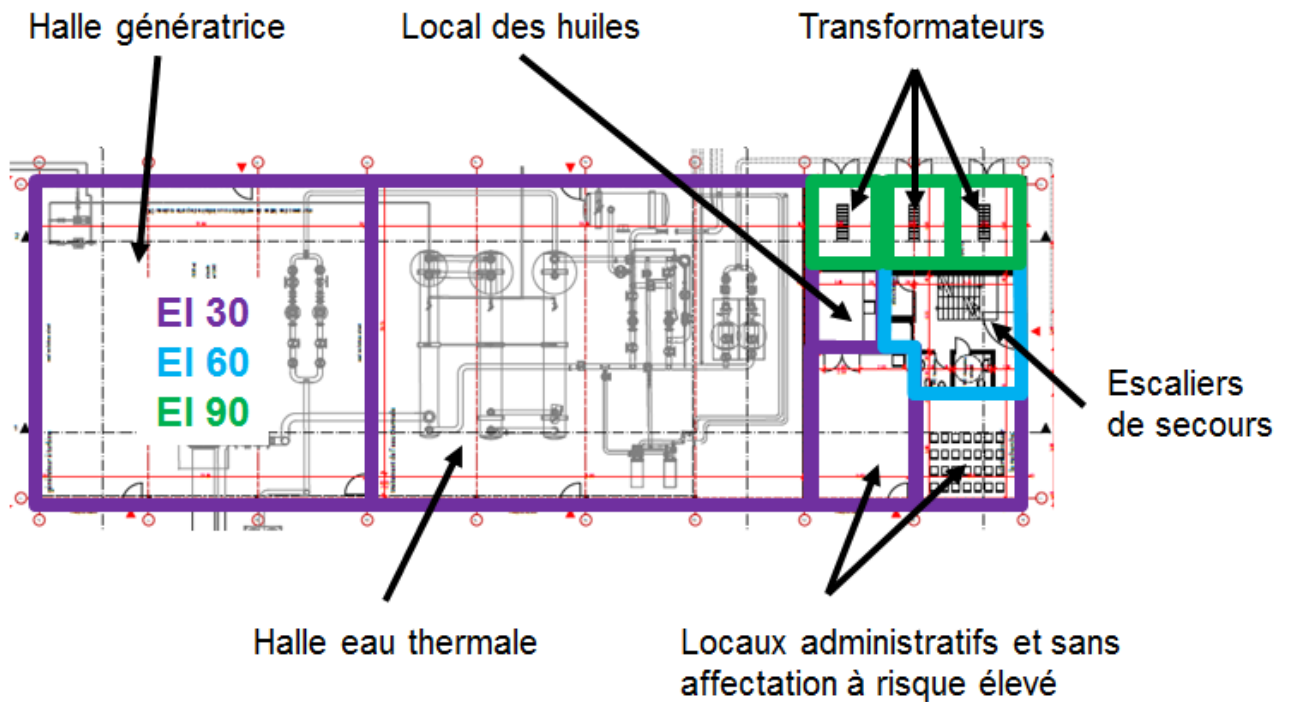


Figure 8 : compartimentage du rez-de-chaussée

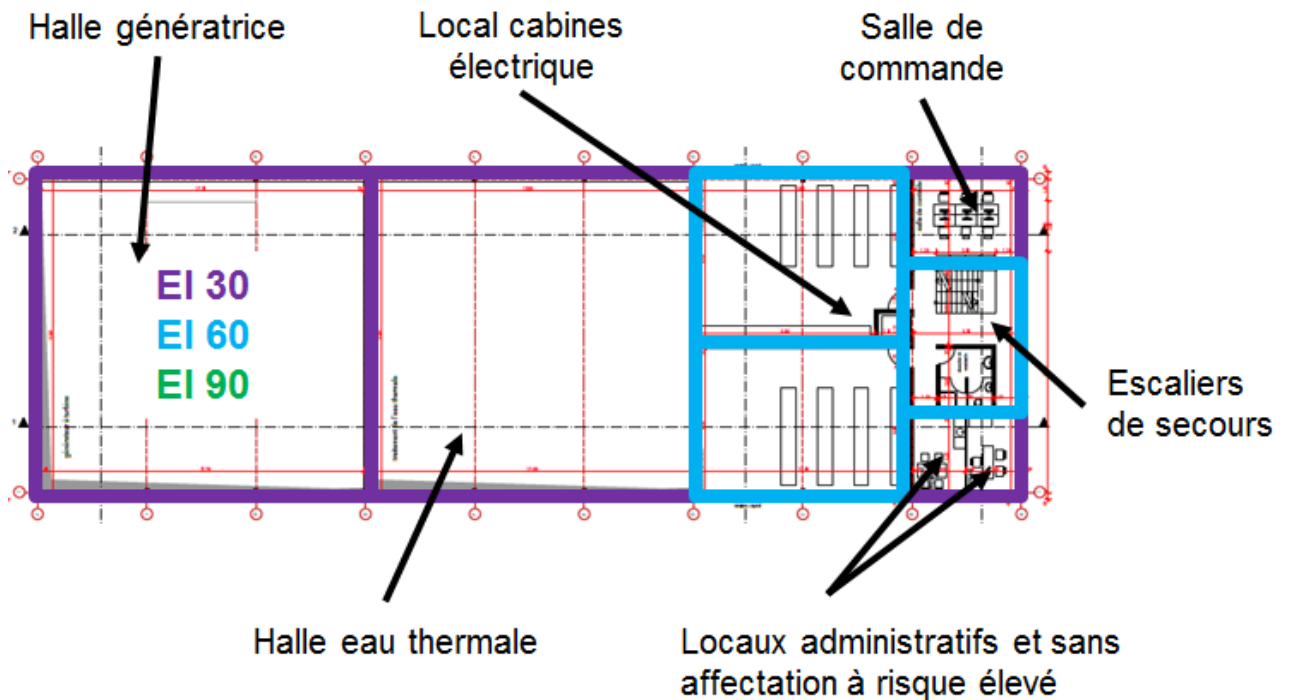


Figure 9 : compartimentage du 1^{er} étage

Le bâtiment comportera des façades aérées (annexe 3) à l'est et à l'ouest afin d'assurer une aération naturelle des locaux où se trouvera l'ORC alors que la façade donnant contre la voie CFF sera en béton armé. Ceci permettra de limiter les risques de formation d'une atmosphère explosive (prévention) et de limiter les effets de souffle si une explosion se produisait malgré tout (protection en cas d'accident) [1].

10.1.3 Voies de fuite

Le bâtiment et le site seront en tout temps évacuables de manière sûre. Les prescriptions AEAI concernant l'évacuation du bâtiment sont reportées sur les figures 10 et 11.

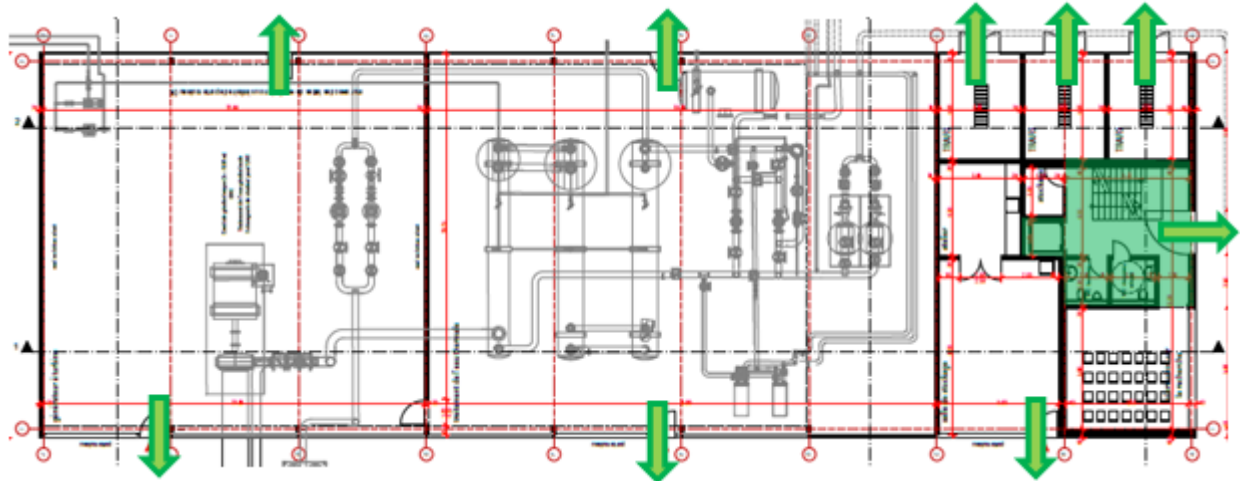


Figure 10 : plan d'évacuation du rez-de-chaussée (le sens correct des portes n'est pas représenté)

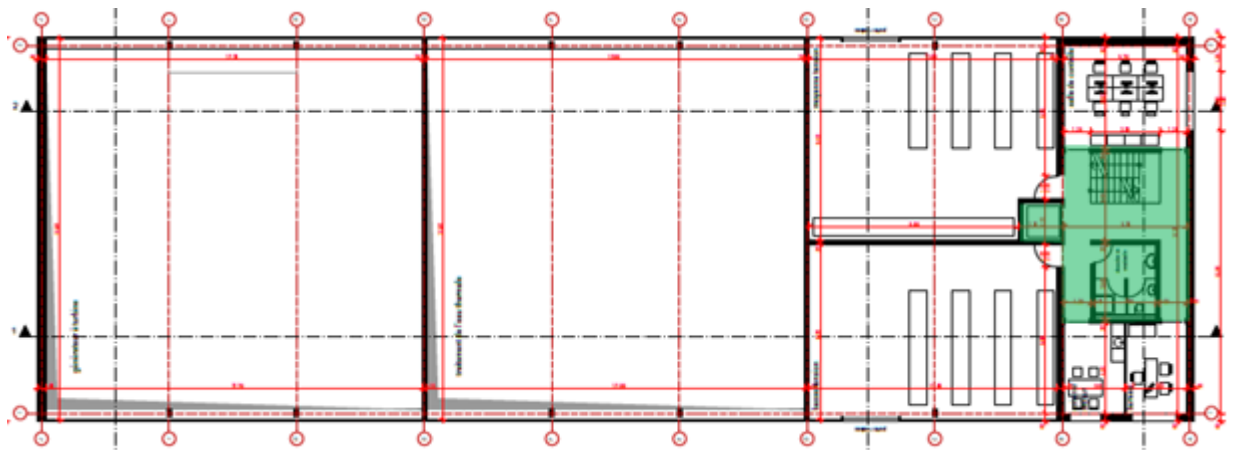


Figure 11 : plan d'évacuation du 1^{er} étage (le sens correct des portes n'est pas représenté)

Les voies de communication sur le site seront en permanence libres afin de garantir l'évacuation du site et l'accès aux services d'interventions.

10.1.4 Rétention des eaux d'extinction

Les eaux d'extinction seront retenues en priorité dans les locaux en cas d'incendie.

Le sol sera en béton. Les écoulements de sol seront munis de siphons et les écoulements seront, en temps normal, fermés par une vanne. Ces vannes ne seront ouvertes que rarement, par exemple en cas de nettoyage du sol avec des quantités importantes d'eau.

Des barrières de retenue des eaux d'extinction seront installées au niveau des portes et des portes à rouleaux. En temps normal, elles seront levées afin que la ventilation au niveau du sol se fasse naturellement. Elles pourront être abaissées de manière automatique à distance en cas d'intervention (incendie ou crue particulièrement importante).

La hauteur d'eau pouvant être retenue sera d'au minimum 30 cm, de sorte que la capacité de stockage du local sera de l'ordre de 100 m³ pour chacun des deux locaux d'exploitation (local de la turbine et traitement de l'eau thermale).

En cas de besoin, une capacité de stockage supplémentaire sera disponible grâce au bassin de rétention des eaux pluviales (420 m³). Etant donné un débit horaire total d'eaux d'extinction estimé à 162-324 m³/h (voir concept de prévention incendie [2]), le volume de rétention permet de retenir les eaux d'une intervention durant plus d'une heure (en tenant compte d'un bassin rempli à 50%).

10.1.5 Réservoir d'hydrocarbure [1]

Les exigences des directives CFST [4] et [5] et SUVA [6] ont servi de base pour la détermination des mesures de sécurité constructives à appliquer.

Le réservoir sera installé à l'extérieur, contre l'une des digues d'un bassin de stockage des eaux de forage. Il sera recouvert de 80 cm de terre au moins, qui servira de protection thermique ; on admettra par conséquent que la température du liquide dans le réservoir ne dépassera pas 30°C, et que par conséquent le réservoir devra résister à une pression minimale de 12 bar en cas d'utilisation de propane (ou 4 bar pour l'isobutane). Vu qu'il sera enterré, aucun système d'arrosage de la citerne ne sera prévu. Grâce à la protection thermique assurée par la terre recouvrant le réservoir, le risque de BLEVE en cas d'incendie du bâtiment d'exploitation est négligeable.

La directive CFST 1941 indique que la distance minimale aux autres objets avoisinants doit être d'au moins 1 m. Dans les faits, les distances seront bien plus importantes (supérieures à 9 m, c.f. annexe 1). La distance à la voie ferrée sera de plus de 15 m, conformément aux exigences de la CFST et des CFF.

10.1.6 Aérorefroidisseurs [1]

La place sous les aérorefroidisseurs sera étanche et équipée de bordures sur l'entier de son pourtour (10-15 cm), ce qui représentera en définitive une rétention de 112-160 m³. Les écoulements de la place seront équipés d'une vanne permettant la rétention des liquides au besoin ; en temps normal, cette vanne sera ouverte afin d'assurer l'écoulement des eaux pluviales. La place sera raccordée au bassin de sécurité des eaux météoriques en aval du site (annexe 1). Ce bassin de 420 m³ sera équipé en sortie d'une vanne contrôlable à distance, qui permettra de retenir les eaux d'extinction en cas d'intervention. Le volume de rétention sera donc constitué du bassin de rétention, des canalisations et de la place sous les aérorefroidisseurs.

10.1.7 Caves de forage

Les caves de forages, qui constituent les points bas principaux du site, seront protégées par un muret d'environ 70 cm de haut. Le risque d'accumulation de gaz inflammables y est donc fortement réduit.

10.2 Mesures techniques

10.2.1 Détection incendie et de gaz inflammables [2]

Les mesures de détection sont les suivantes en fonction des affectations :

Affectation	Détection incendie	Détection gaz inflammable
Rez-de-chaussée Local génératrice	oui	oui
Rez-de-chaussée Local eau thermique	oui	oui
Rez-de-chaussée Autres locaux	oui	non
Rez-de-chaussée Cage d'escaliers de secours	oui	non
1 ^{er} étage Tous les locaux	oui	non
1 ^{er} étage Cage d'escaliers de secours	oui	non

10.2.2 Réservoir d'hydrocarbure [1]

Le réservoir répondra à l'état de la technique, en particulier au niveau :

- des soupapes de sûreté,
- du contrôle du niveau et de mesures contre le sur-remplissage,
- des dispositifs de sécurité en cas de rupture de conduites
- de la détection et de la rétention des fuites, avec un réservoir et des conduites à double-paroi et détecteur de fuite,
- de la protection contre la foudre.

Concernant la protection contre la corrosion, outre les mesures habituelles pour les réservoirs enterrés, des mesures particulières pourront être prises afin de protéger les installations enterrées contre les courants vagabonds liés à la proximité de la ligne CFF.

Au besoin, le réservoir et les conduites situées dans le sol seront arrimées afin d'éviter tout risque de soulèvement par flottation. Ce point sera précisé au moment de la planification de détail de l'installation.

10.2.3 ORC [1]

L'ORC est semblable à de nombreux systèmes de récupération, d'utilisation ou de dissipation de la chaleur. Les mesures préventives habituelles pour ce type d'installations (choix de matériaux adaptés au fluide choisi et aux conditions d'exploitation et raccords parfaitement étanches entre les éléments de l'ORC, définition des zones ATEX, utilisation d'appareils EX, ...) seront mises en place selon l'état de la technique. Les mesures de protection préventives seront définies pour répondre aux besoins en conditions normales ainsi qu'en conditions anormales.

Les mesures d'urgence habituelles pour ce type d'installations (systèmes de vannes à fermeture automatique, soupapes de sécurité, protection incendie, ...) seront mises en place selon l'état de la technique.

Les détails sont développés au chapitre 11.5.2, point 11.

10.2.4 Ventilation [2]

La ventilation des locaux revêt plusieurs aspects.

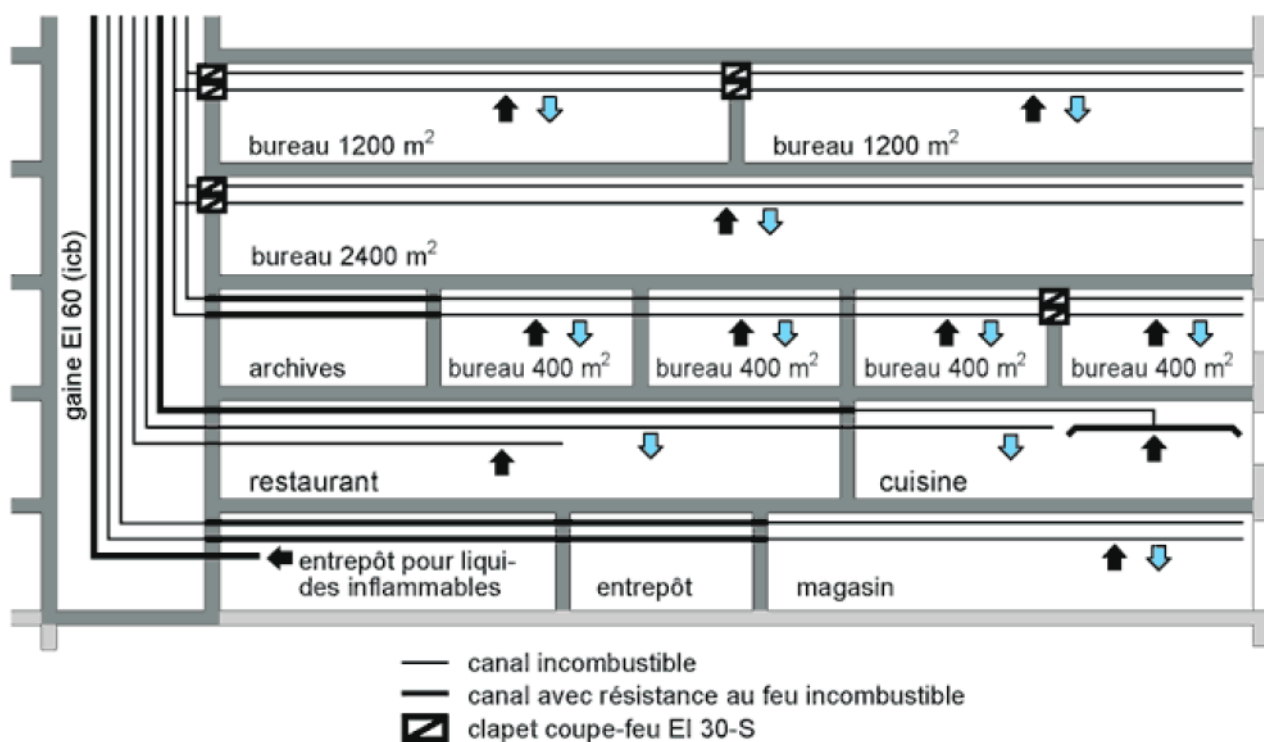


Figure 12 : schéma de principe du compartimentage des ventilations

Les halles « générateur » et « eau thermique » sont aérées naturellement par des ouvertures (lamelles) en façade et seront ventilées mécaniquement en cas de détection de gaz inflammable (ventilation de secours).

Les locaux transformateurs sont ventilés avec sortie directe sur l'extérieur.

Les autres locaux sont aérés ou ventilés selon les besoins et les canaux de ventilation conçus selon la directive AEA1 26-03 ad. au chiffre 4.8.2 précise le compartimentage à adopter.

La ventilation des halles de production est un point clef de la limitation du risque d'explosion. En effet, si l'aération est suffisante (forcée si nécessaire), une accumulation de gaz inflammable en dessus de LII sera improbable.

10.2.5 Protection foudre [2]

Le bâtiment et les installations annexes doivent être protégés contre la foudre selon les prescriptions de la directive AEAI 23-03 et selon les recommandations de l'ASE.

10.3 Mesures organisationnelles

10.3.1 Gestion des visiteurs

La restriction d'accès au site pour les visiteurs pendant les travaux de maintenance doit être réalisée. Une limitation du nombre de visiteurs simultanés doit aussi être prévue.

10.3.2 Utilisation des substances dangereuses [1]

Le dépotage du fluide caloporteur, avant la mise en service de l'installation, sera fait par une entreprise spécialisée. Une étude de risque sera effectuée avec l'entreprise spécialisée plusieurs jours au moins avant l'opération afin que d'éventuelles mesures complémentaires de protection puissent être mises en place au besoin. Les directives et le mode opératoire de l'entreprise spécialisée seront suivis.

Le déchargement et la manutention des autres liquides, gaz ou déchets seront faits selon l'état de la technique. Selon l'état actuel du projet, les quantités à utiliser seront faibles ; la contenance des récipients sera aussi limitée. Au besoin, des mesures particulières pourront être mises en place de sorte afin de s'assurer que ces substances ne présenteront pas une source particulière d'accident majeur.

Le Guide pratique pour l'entreposage des matières dangereuses sera observé pour la conception et la réalisation du projet [7].

10.3.3 Gestion des déchets spéciaux

La gestion des déchets spéciaux se fait selon les règles en vigueur OMoD :

- Locaux ad hoc ;
- Rétention ;
- Pas de mélange de produits incompatibles ;
- Etiquetage conforme ;
- Reprise par des entreprises agréées.

10.3.4 Autres mesures

D'autres mesures seront encore mises en place en fonction de l'avancement du projet et des besoins. Notamment :

- Collaboration avec l'exploitant ;
- Collaboration avec les services d'interventions ;
- Plan d'intervention ;
- Collaboration avec les CFF ;
- Exercices de gestion d'accidents ;
- Règles pour les entreprises tierces travaillant sur le site ;
- Règles pour la gestion des visiteurs ;
- Définition des équipements de protection individuelle ;
- SOP des installations.

11 Analyse de risque liée au fluide caloporteur [8]

11.1 Description de la méthode d'analyse

L'analyse des risques est réalisée à l'aide de la méthode des arbres des causes et des arbres d'événement et se base sur les sources bibliographiques suivantes :

- Concernant la construction des arbres des causes et des conséquences ainsi que la fréquence des événements: le rapport cadre « Stockage de gaz liquéfié » [9] de Basler et Hofmann.
- Certaines informations concernant les fréquences de défaillance des équipements sont aussi basées sur: « Guidelines for quantitative risk assessment », TNO, 2005.

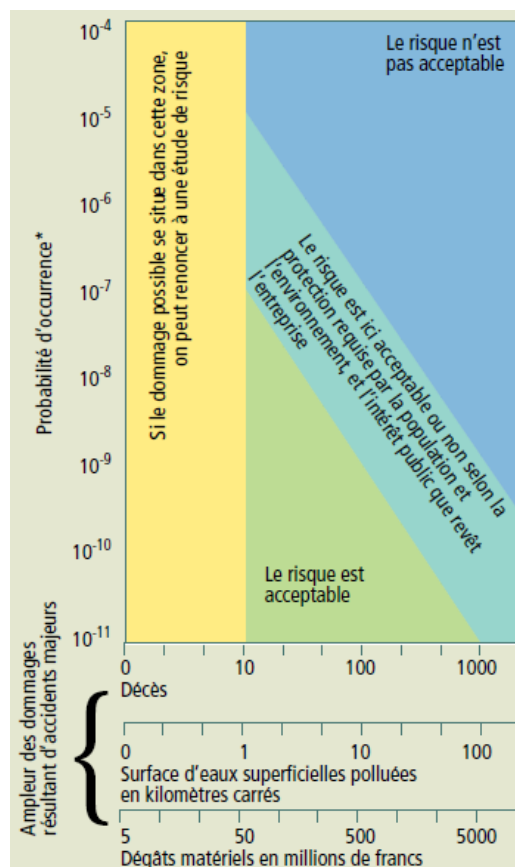
Les modélisations numériques de perte de confinement, de dispersion et d'inflammation sont modélisées avec le logiciel Effects 8.1.6.5654 édité par le TNO.

Le rapport cadre d'étude des stockages de GPL indique clairement que les événements majeurs au sens de l'OPAM se résument aux libérations importantes de gaz susceptibles de provoquer des dommages au-delà des limites de l'entreprise (voir article 2 alinéa 4a, OPAM). Les libérations mineures ne sont que des événements déclencheurs de libérations importantes.

Seul l'indicateur du nombre de décès a été pris en compte car les scénarios pour lesquels le nombre de blessés est pénalisant par rapport au nombre de morts sont les scénarios de dispersion atmosphérique de produits toxiques. Les simulations réalisées dans cette étude se basent sur du propane qui n'est pas considéré comme toxique.

Une pollution des sols ou de l'eau est à exclure par le fluide caloporteur car le propane et le butane sont des gaz à température ambiante. De ce fait, même lors d'un rejet massif, l'ébullition sera prépondérante par rapport à l'infiltration dans le sol. De même, il ne peut pas y avoir de mélange eau d'extinction – gaz liquéfié possible. La température d'une nappe de gaz liquéfié est égale à la température d'ébullition du gaz. Si on ajoute de l'eau à température ambiante, le gaz liquéfié flashe et il ne reste que de l'eau (le résultat sera identique avec de la mousse). Selon le cas (propane/butane) on peut créer de la glace et bloquer du gaz à l'intérieur mais celui-ci sera libéré lors de la fonte celle-ci.

Dans le cas d'un accident impliquant de l'isopentane, le concept de protection est basé sur une capacité de rétention de la totalité de l'hydrocarbure en phase liquide dans le bâtiment de la centrale et dans le bac de rétention étanche situé sous les aéroréfrigérateurs. Le réservoir de stockage du fluide sera à double paroi. Les détails constructifs seront précisés dans le projet d'exécution. Une infiltration dans les sols et dans la nappe superficielle ou une pollution importante des eaux usées est ainsi exclue.



Pour ce qui est des dégâts matériels, une rame de train neuve coûte environ 20 MFr pour les derniers modèles. En cas de déraillement, l'influence sur la courbe cumulative est négligeable et, par conséquent, ce paramètre n'a pas été inclus plus avant. Selon les informations transmises par les CFF, les coûts de réfection au niveau de l'infrastructure ferroviaire s'élèveraient à environ 800 CHF/m sur une distance de 200 m environ.

11.2 Propriétés des substances

11.2.1 Propriétés physico-chimiques [12,13]

	Propane	Isobutane	Isopentane
CAS	74-98-6	75-28-5	78-78-4
Formule chimique	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂
Masse molaire (g/mol)	44.1	58.12	72.15
Etat à 20°C et 1 bar	Gazeux	Gazeux	Liquide
T ébullition (°C)	-42	-12	28
Point d'inflammation (°C)	-104	-83	< -56
T d'auto-inflammation (°C)	470	460	420
Propriétés explosives			
➤ LII (Vol%)	1.7 (31 g/m ³)	1.5 (37 g/m ³)	1.3 (38 g/m ³)
➤ LSI (Vol%)	10.8 (202 g/m ³)	9.4 (231 g/m ³)	7.6 (230 g/m ³)
Pression de vapeur (mbar)	8.3 à 20°C	3.0 à 20°C	0.76 à 20°C
Enthalpie vaporisation (kJ/kg)	425		
Chaleur spécifique (J/mol/K)	74.3 (gaz à 1 atm et 25°C)		
Densité de vapeur (kg/m ³)	2.01 (0°C) 1.87 (15°C)	2.70 (0°C) 2.51 (15°C)	2.12 (mélange vapeur – air à 20°C)
Solubilité dans l'eau à 20°C (g/cm ³)	75 * 10 ⁻⁶	49 * 10 ⁻⁶	48 * 10 ⁻⁶
Densité à l'état liquide (g/cm ³)	0.58	0.59	0.62
Coefficient de partition octanol/eau (log K _{ow})	3	2.76	N.D.
pH	N.A.	N.A.	N.A.
Odeur	Douceâtre	Douceâtre	Odeur de benzine
Seuil de perception	Produit d'odeur infecte souvent ajouté	Produit d'odeur infecte souvent ajouté	N.D.

Tableau 2 : propriétés physicochimiques des substances

N.A. = non applicable, N.D. = non disponible

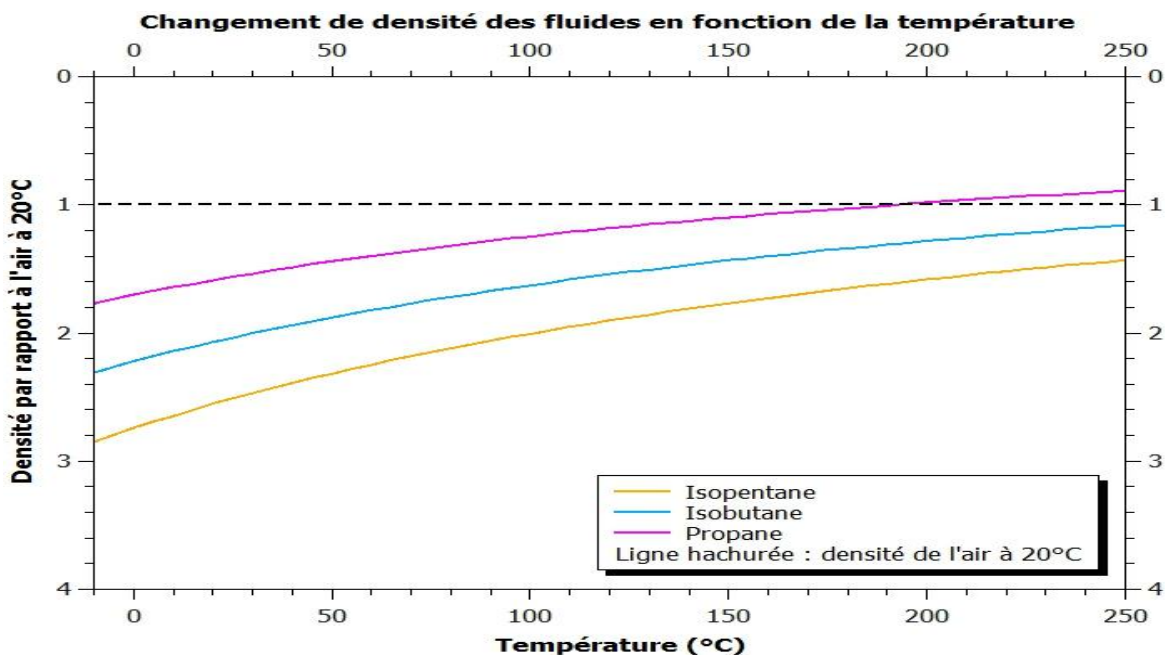


Figure 13 : changement de densité des vapeurs en fonction de la température. La ligne hachurée représente la densité de l'air à 20°C fixée à 1. Le graphique montre que la densité du propane devient inférieure à celle de l'air aux alentours de 190 °C, alors que cette température est supérieure à 250°C pour les deux autres substances

11.2.2 Physiologie-toxicologie [10]

		Propane	Isobutane	Isopentane
VME	(ml/m ³ ou ppm)	1'000	800	600
	(mg/m ³)	1'800	1'900	1'800
VLE	(ml/m ³)	4'000	-	1'200
	(mg/m ³)	7'000	-	3'600
LC₅₀	(ppm)	N.D.	N.D.	N.D.

Tableau 3: VME et VLE des fluides caloporteurs

11.2.3 Compatibilités avec les matériaux

Les réactions dangereuses des 3 substances considérées peuvent être résumées comme suit :

- Risques d'explosion en contact avec des substances oxydantes ;
- Formation possible de composés toxiques au contact des substances halogénées, de NO_x ou d'acétylène.

A noter encore que le choix des joints en contact avec ces substances doit être adéquat (p.ex. PTFE) afin d'assurer une étanchéité durable.

11.2.4 Comportement des substances concernées dans l'environnement

Les propriétés du propane et de l'isobutane sont semblables. A l'état gazeux à température et pression ambiante, ils sont plus denses que l'air et ont tendance à s'accumuler au niveau du sol et dans les points bas. Le risque principal lié à ces gaz est l'explosion. A l'air libre, aucune formation de composés particulièrement toxiques n'est attendue.

Le point d'ébullition de l'isopentane est de 28°C à pression atmosphérique. Sous forme liquide, l'isopentane est peu soluble et moins dense que l'eau.

11.2.5 Toxicité pour les organismes aquatiques

	Propane	Isobutane	Isopentane
EC ₅₀	7 mg/l (D. magna, 48h)	~ 16 mg/l (D. magna, 48h) * ~ 8.6 mg/l (Algues) *	2.3 mg/l (D. magna, 48h)
LC ₅₀	24 mg/l (divers poissons)	~ 28 mg/l (divers poissons) *	12.8 mg/l (P. promelas, 96h)
Remarques	Risque faible dans l'environnement car gazeux	Risque faible dans l'environnement car gazeux	Facilement biodégradable

Tableau 4: toxicité pour les organismes aquatiques

* Valeurs calculées

11.3 Approvisionnement et stockage

L'utilisation de l'hydrocarbure en tant que fluide caloporteur se fera en circuit fermé. Avant la mise en route de l'installation, le fluide caloporteur sera introduit dans l'installation par une entreprise spécialisée. Le remplissage et la mise en route d'une installation de ce type est courante. Sauf en cas de fuite accidentelle, il n'y aura pas de perte ou de consommation d'hydrocarbure.

11.4 Identification des dangers

Selon le rapport cadre « stockage de gaz liquéfiés » édité par l'OFEV en 1995 deux événements accidentels de libération de gaz liquéfié, dans ce cas du propane, de l'isobutane ou de l'isopentane doivent être retenus dans le cadre d'une étude de risques OPAM:

- Une rupture catastrophique d'un réservoir
- Une fuite continue suit à la rupture guillotine d'une conduite.

Les petites fuites (joints ou soupapes fuyardes) ne sont pas considérées ici dans la mesure où leurs conséquences seraient moins importantes que celles induites par les deux autres événements.

Le second scénario concerne une fuite continue (rupture guillotine) d'une conduite. Pour être pertinent, ce scénario doit être simulé sur des équipements contenant une grande quantité de gaz liquéfié sous pression. Deux cas sont ainsi retenus :

- Au niveau de la pompe après les condenseurs (indexé 1 sur la figure)
- Au niveau de l'aire de dépotage des camions remplissant la citerne (indexé 2 sur la figure).

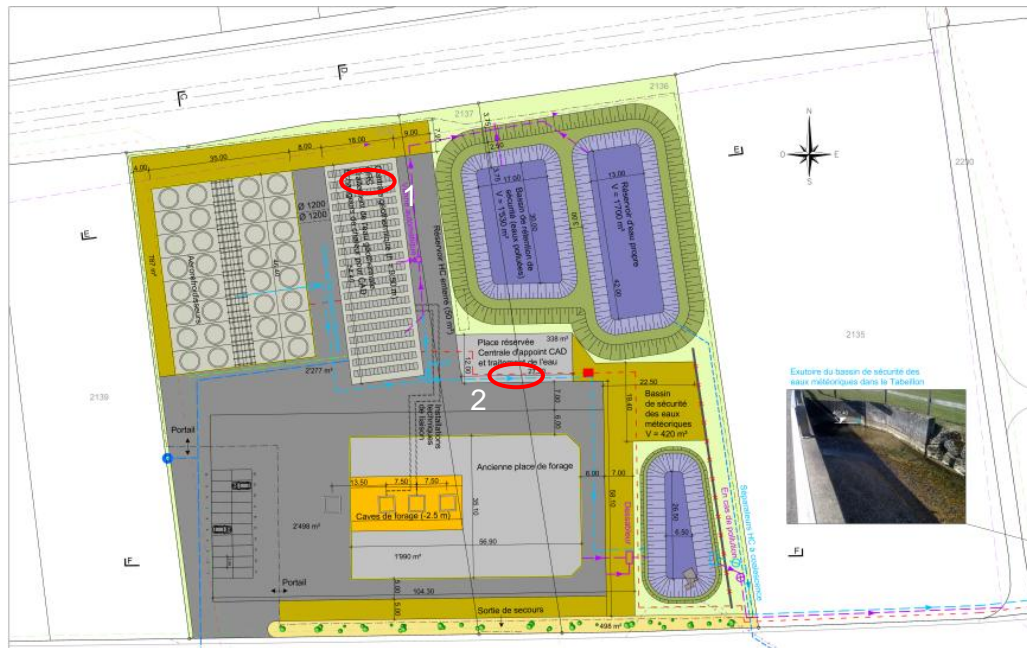


Figure 14 : position des fuites continues

Les dangers potentiels suivants ont été identifiés dans les sous-chapitres suivants.

11.4.1 Rupture catastrophique de la citerne de propane liquéfié

Causes :

- Contraintes mécaniques externes
 - o Séisme
 - o Chute d'un avion
 - o Accident impliquant un véhicule lourd
 - o Sabotage
- Incendie à proximité
- Pression supérieure à la pression d'éclatement
 - o Citerne trop pleine
 - Soupapes de sécurité bloquées
 - Sur-remplissage
 - o Remplissage mauvais produit.

Conséquences :

- Formation d'une nappe de liquide
 - o Incendie
 - Flux thermiques de radiation
 - Dispersion de gaz de combustion
 - Pollution des eaux à cause des eaux d'extinction
 - o Formation d'un nuage de gaz
 - Inflammation
 - Dispersion d'un nuage de gaz
 - Explosion du nuage (Vapor Cloud Explosion, VCE)
 - o Onde de surpression
 - Dispersion du nuage sans inflammation.

11.4.2 Fuite continue d'une conduite suite à la rupture catastrophique d'une pompe

Causes :

- Séisme
- Vanne d'isolement défectueuse
- Rupture de la conduite
 - o Incendie
 - o Défaillance catastrophique de la pompe
 - o Erreur humaine
 - o Autre
- Sabotage

Conséquences :

- Formation d'un nuage de gaz
 - o Inflammation immédiate
 - « Jet Fire »
 - Flux thermiques de radiation
 - o Inflammation retardée
 - Dispersion du nuage
 - Explosion
 - Onde de surpression.

11.4.3 Fuite continue au niveau de la citerne de stockage

Causes :

- Fuite de la citerne
 - o Joints défectueux
 - o Soupape de sécurité s'ouvrant spontanément
- Libération lors du dépotage
 - o Coté citerne
 - Vanne d'isolement en panne
 - Arrachage du flexible
 - Démarrage camion flexible branché
 - Effets extérieurs
 - Rupture du flexible lors du remplissage
 - o Coté camion
 - Vanne d'isolement en panne
 - Arrachage du flexible
 - Démarrage camion flexible branché
 - Effets extérieurs
 - Vanne de fond en panne
 - o Sur-remplissage et libération par la soupape.

Conséquences :

- Formation d'un nuage de gaz
 - o Inflammation immédiate
 - « Jet Fire »
 - Flux thermiques
 - o Inflammation retardée
 - Explosion
 - Dispersion d'un nuage inflammable
 - Onde de surpression.

11.5 Description des scénarios

11.5.1 Arbre des causes [9]

« L'arbre des causes est très efficace pour l'examen de la fiabilité des systèmes techniques. Dans un arbre des causes, on part d'un danger ou d'un événement indésirable (= Top Event) pour en rechercher toutes les causes. »

Trois événements indésirables ont été identifiés :

- 1 : Une rupture catastrophique de la citerne de 50m³.
- 2 : Une fuite continue sur la conduite menant aux pompes de condensat.
- 3 : Une fuite continue sur la citerne de 50m³.

Les figures 16 à 18 présentent les arbres des causes des trois scénarios retenus.

Les différentes causes sont associées par des liens logiques Et et/ou OU. Lorsque deux causes indépendantes sont nécessaires pour conduire à l'événement indésirable (porte ET représentée par ○) alors la fréquence totale est le produit des fréquences des deux causes (causes 1a et 1b). Lorsque plusieurs causes indépendantes peuvent conduire à l'événement indésirable (porte OU représentée par □), alors la fréquence finale est la somme des fréquences des causes indépendantes.

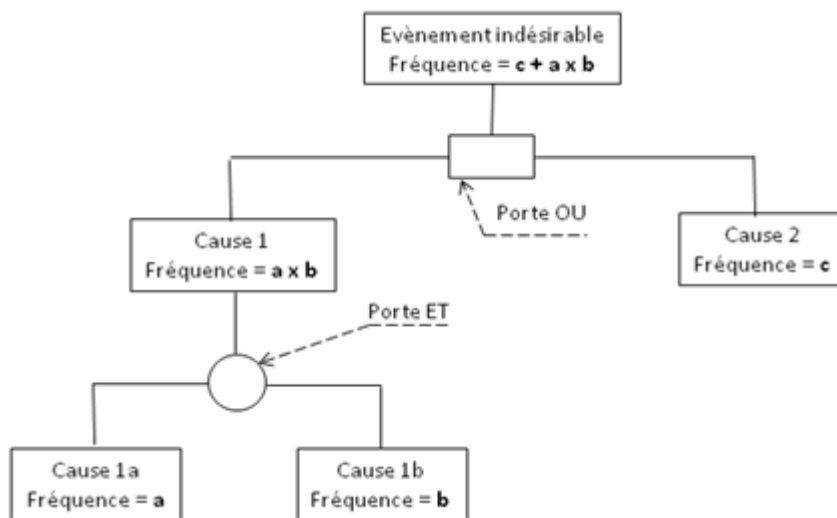
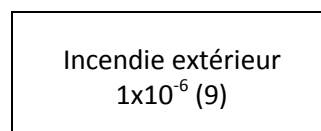


Figure 15 : principe de fonctionnement de l'arbre des causes

Exemple : dans la figure suivante, la case contient la nature de l'événement (Incendie extérieur), sa fréquence en cas par année (1×10^{-6}) et une référence (9).



Le chiffre (9) est un renvoi vers la section 11.5.2. Les sources et les raisons du choix de la fréquence sont définies dans cette section.

Rupture catastrophique de la citerne de propane liquéfié

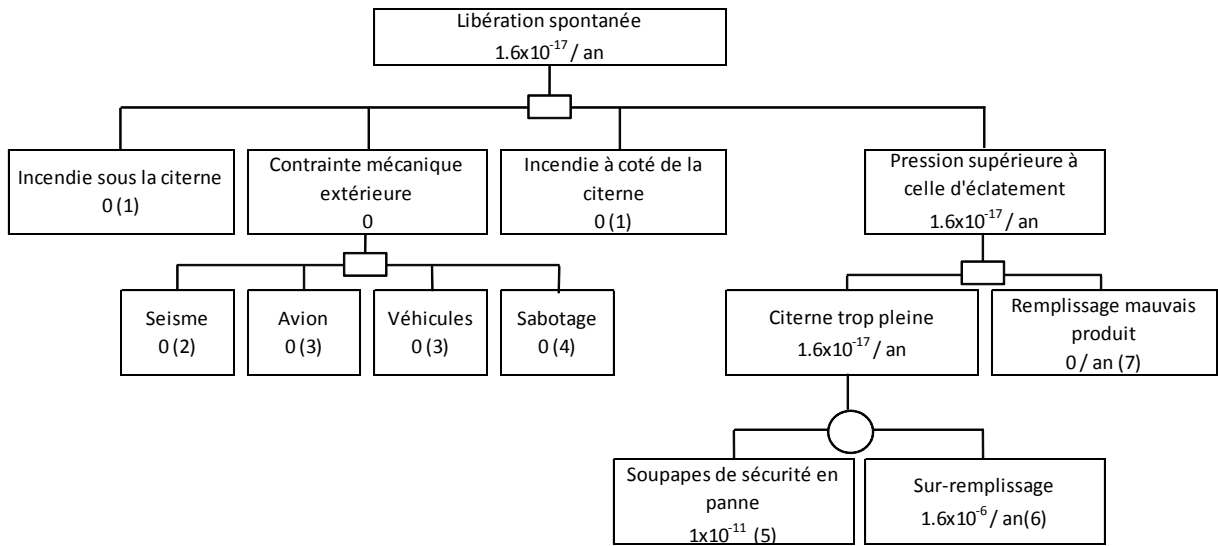


Figure 16: arbre des causes d'une rupture instantanée de la citerne de propane liquéfié

La fréquence associée à une rupture instantanée de la citerne de gaz liquéfié est de 1.6×10^{-17} cas par an. Cette fréquence est inférieure à la fréquence minimale considérée pour les études OPAM (10^{-11} cas par an). Ce scénario n'est donc pas retenu.

Fuite continue de la conduite avant la pompe

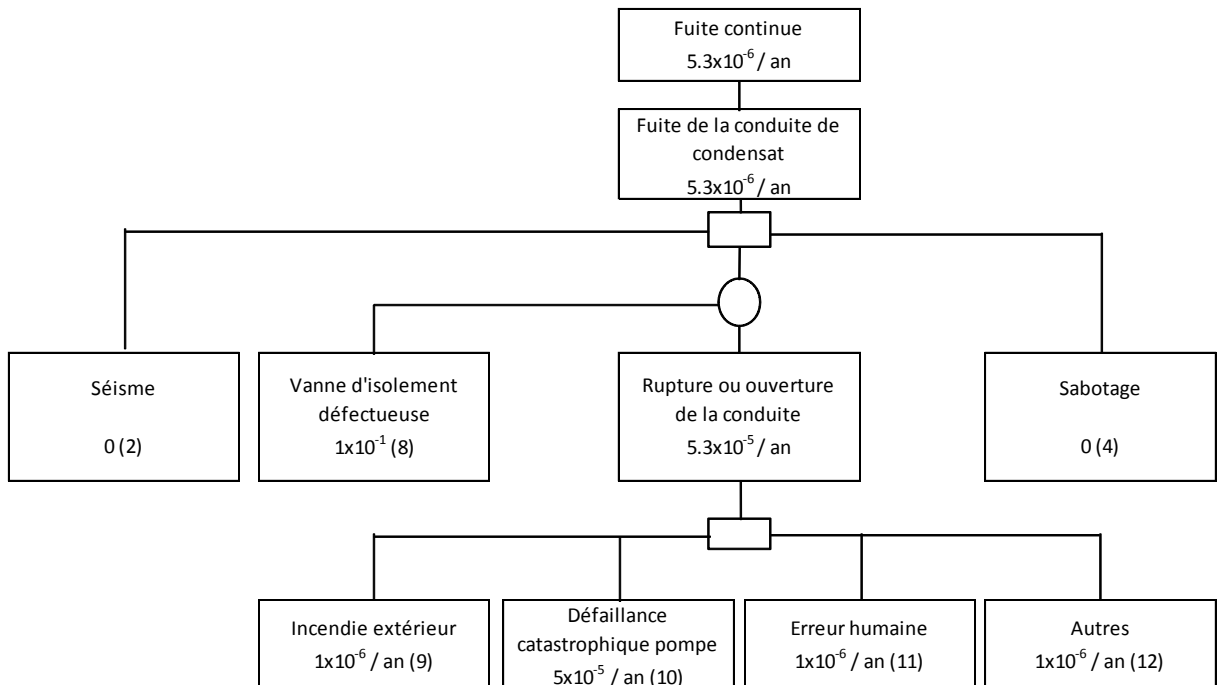


Figure 17 : arbre des causes d'une fuite continue au niveau de la pompe

Fuite continue au niveau de la citerne

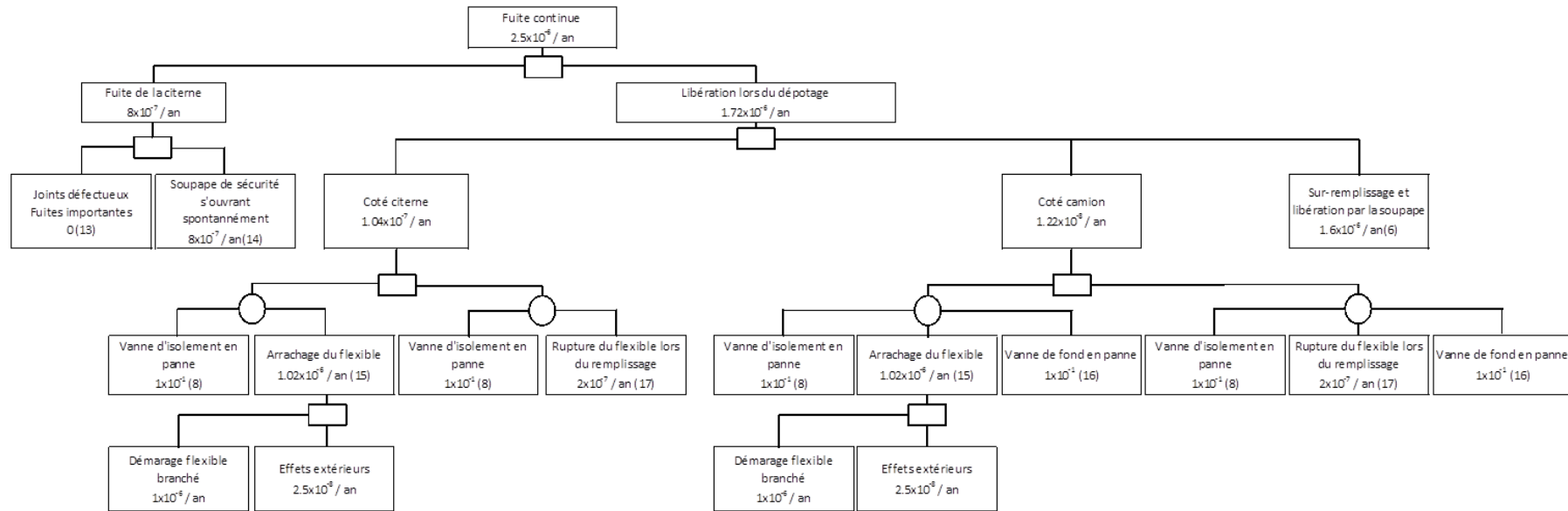


Figure 18 : arbre des causes d'une fuite continue au niveau de la citerne

11.5.2 Justification des valeurs numériques des fréquences présentées dans les arbres des causes

1, Incendie sous ou à côté de la citerne de 50m³ de propane liquéfié : La citerne étant enterrée, elle ne serait pas impactée par un feu externe. La fréquence associée à cette cause est nulle.

2, Séisme : Le risque sismique n'est pas considéré dans le cadre de l'OPAM si la construction respecte la norme SIA 261. La fréquence associée à cette cause est nulle.

3, Chute d'avion, impact avec un véhicule lourd : La citerne est enterrée sous 80cm de terre. Cette configuration permet de protéger de façon passive des risques associés à une rupture par impact mécanique.

4, Sabotage : La fréquence liée au sabotage est nulle car il ne s'agit pas d'un accident mais d'un acte volontaire, il n'entre donc pas dans le cadre de cette étude.

5, Soupape de sécurité bloquée : Les citernes de propane liquéfié sont équipées de blocs de 4 soupapes de sécurité. Le rapport cadre propose que la probabilité correspondante au blocage simultané des 4 soupapes soit de 10^{-11} . (Rapport cadre « Stockage de gaz liquéfié » 1ere édition française, Basler&Hofmann, (1995)).

6, Sur remplissage et vidange par la soupape : La fréquence de sur-remplissage de la citerne sans que le chauffeur ne le remarque peut être estimée à 8×10^{-5} par an pour 12 remplissages par an (Rapport cadre « Stockage de gaz liquéfié » 1ere édition française, Basler&Hofmann, (1995)). Cette citerne n'est remplie qu'une fois tous les 4 ans. La valeur présentée dans le rapport cadre doit donc être divisée par 48. La fréquence de 1.6×10^{-6} par an est retenue.

7, Remplissage mauvais produit : Par exemple propane au lieu d'isobutane ou isopentane. Cette fréquence peut être estimée à 10^{-5} par remplissage dans le cas où on n'utiliserait pas le propane. Combinée avec la fréquence de défaillance des soupapes de sécurité, la fréquence totale sera très faible.

8, Vanne d'isolement défectueuse : L'isolation de la conduite entre les condenseurs et les pompes est réalisée à l'aide de deux vannes asservies montées à chaque extrémité de cette conduite. La probabilité de défaillance de 10^{-1} est retenue (valeur conservative) car il n'y a pas de redondance du système de sécurité.

9, Incendie extérieur : Selon (Nikodem, 1988), rapporté par le rapport cadre (Rapport cadre « Stockage de gaz liquéfié » 1ere édition française, Basler&Hofmann, (1995)), la fréquence d'une contrainte thermique extérieure à l'installation de stockage conduisant à un accident majeur de l'installation d'une portée supérieure à 10m s'élève à 10^{-6} par année.

10, Défaillance catastrophique d'une pompe : Selon le Purple Book, la fréquence de rupture catastrophique d'une pompe équipée d'un carter de protection est de 5×10^{-5} /an (« Guidelines for quantitative risk assessment », TNO, 2005).

11, Erreur humaine : Le rapport cadre fixe la probabilité liée à une négligence à 10^{-4} (Rapport cadre « Stockage de gaz liquéfié » 1ere édition française, Basler&Hofmann, (1995)). Hors, dans le cadre de cette étude, la conduite étudiée n'est pas l'objet d'intervention en fonctionnement normal. Selon les informations fournies par la société Geco GmbH à Augsburg (D) en charge de la planification technique de la centrale, les pompes doivent être changées tous les 10 ans. Lors de cette opération, la pompe devant être changée est isolée par deux vannes « block and bleed » (une de chaque côté de la pompe). Ces vannes sont constituées de 2 fermetures indépendantes (la première automatique, la seconde manuelle) entre lesquelles se trouve un piquage. Ce piquage permet de vidanger la section de conduite entre les vannes. Une fois cette section vidée, il permet de s'assurer que la première vanne (automatique) n'est pas fuyarde. En effet, un renifleur est installé au voisinage de cette vanne et détecte la présence de gaz. En cas de fuite de la vanne automatique, l'étanchéité du système est assurée par la vanne manuelle. Celle-ci peut être consignée durant la durée des travaux ce qui permet d'éviter une ouverture intempestive. Ce système permet d'assurer une isolation complète de la pompe et de détecter la présence de fuite. Ce système permet de réduire à 10^{-6} /an la fréquence liée aux erreurs humaines.

12, Autre : Rupture spontanée d'une conduite. Le rapport cadre (Rapport cadre « Stockage de gaz liquéfié » 1ere édition française, Basler&Hofmann, (1995)) conseille de choisir une fréquence de 1×10^{-6} cas par an pour la rupture d'une conduite.

13, Joints défectueux : Le rapport cadre (Rapport cadre « Stockage de gaz liquéfié » 1ere édition française, Basler&Hofmann, (1995)) considère que la probabilité de défaillance d'un joint ou d'une bride conduisant à une fuite massive continue est nulle.

14, Soupape de sécurité défaillante : Le rapport cadre (Rapport cadre « Stockage de gaz liquéfié » 1ere édition française, Basler&Hofmann, (1995)) estime que la fréquence qu'une soupape de sécurité s'ouvre spontanément est de 2×10^{-7} cas par an et par soupape. Comme le réservoir possède quatre soupapes de sécurité, la fréquence correspondante est de 8×10^{-7} cas par an.

15, Arrachage du flexible : L'arrachage du flexible peut être dû à de la négligence ou bien à une contrainte extérieure. La négligence consiste au départ du chauffeur alors que le camion est toujours relié à la citerne. Le rapport cadre (Rapport cadre « Stockage de gaz liquéfié » 1ere édition française, Basler&Hofmann, (1995)) estime cette probabilité à 5×10^{-5} par an pour 12 remplissages par an. Dans la mesure où cette citerne est remplie une fois tous les 4 ans, cette fréquence doit être divisée par 48. Elle devient égale à 1×10^{-6} . Les contraintes extérieures concernent les accidents qui pourraient survenir simultanément à un remplissage, le rapport cadre les estime à 1.2×10^{-6} cas par an. Ici aussi, dans la mesure où la citerne est remplie 1 fois tous les 4 ans, cette fréquence doit être divisée par 48, soit 2.5×10^{-8} cas par an.

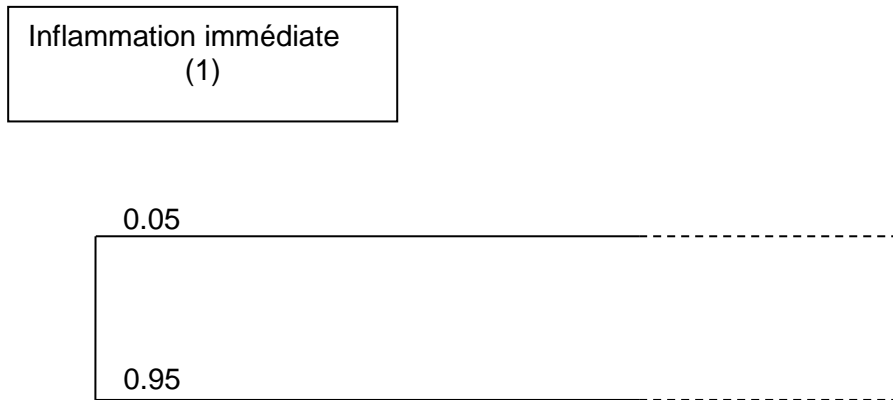
16, Vanne de fond en panne : Le rapport cadre (Rapport cadre « Stockage de gaz liquéfié » 1ere édition française, Basler&Hofmann, (1995)) donne la même justification pour l'estimation de la probabilité de défaillance d'une vanne de fond que pour l'estimation de la défaillance d'une vanne d'isolement. Egalement, puisqu'il n'y a pas de redondance, la valeur de 10^{-1} est retenue (valeur conservatrice).

17, Rupture du flexible lors du remplissage : Le rapport cadre (Rapport cadre « Stockage de gaz liquéfié » 1ere édition française, Basler&Hofmann, (1995)) estime la probabilité de rupture spontanée du flexible de remplissage de la citerne à 8×10^{-7} cas par remplissage soit ici une fréquence de 2×10^{-7} cas par an.

11.5.3 Arbre des conséquences [7]

A partir d'un événement indésirable, on analyse la succession possible des événements postérieurs (Figure 19). A la différence d'un arbre des causes, il s'agit en général d'une séquence chronologique des événements. Chaque ramification de l'arbre dépend d'une réponse « oui/non ». Par convention, on considère que la branche la plus basse d'un événement porte la fréquence à laquelle celui-ci ne se produit pas. La justification des valeurs des fréquences d'occurrence de chaque événement se trouve au paragraphe 11.5.4. La référence est indiquée sur l'arbre des conséquences par le nombre entre parenthèses dans les cases des événements.

Exemple :



Probabilité d'événement positif : 0.05

Probabilité d'événement négatif : $1-0.05=0.95$

Le nombre (1) se rapporte à la section 11.5.4 qui présente les justifications des valeurs retenues pour la probabilité des événements.

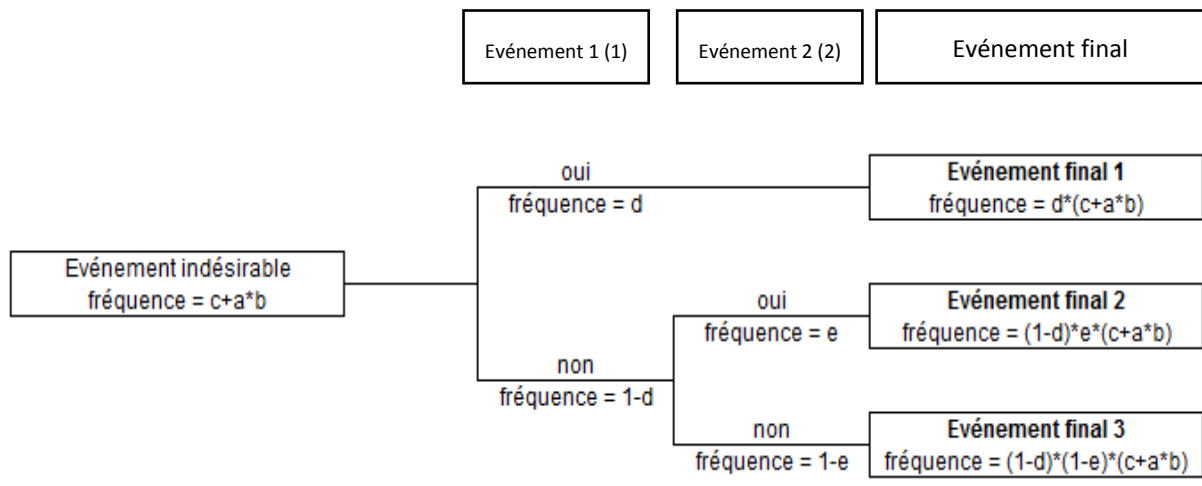


Figure 19 : exemple d'arbre d'événement

Chaque sortie de l'arbre des événements (scénario) implique une évaluation de l'extension des dommages et de leur probabilité. La probabilité de chaque scénario s'obtient en procédant à l'évaluation numérique des arbres des causes et des événements. On évalue les dommages à l'aide des modèles d'effets et d'explosion.

Les conséquences des événements indésirables suivants sont étudiées :

1 : Une fuite continue sur la conduite menant à la pompe de liquide.

2 : Une fuite continue sur la citerne de 50m³.

Le scénario portant sur la rupture catastrophique de la citerne n'est pas décrit car la fréquence associée est trop faible.

L'arbre d'événement de la fuite continue au niveau des pompes est présenté figure 20. Deux arbres d'événements ont été réalisés pour le scénario de fuite sur la citerne afin de tenir compte des différents cas de figures où des visiteurs pourraient être présents. Ils sont présentés sur les figures 21 et 22 respectivement.

La séquence des événements est décrite ci-après :

Fuite continue au niveau de la pompe :

- Inflammation immédiate :
 - o Création d'un jet fire. Le feu est dirigé dans l'axe de la conduite puisqu'il s'agit d'une rupture guillotine. Si un jet fire se produit, alors les flammes seront dirigées vers l'est. Le jet fire sera quasiment parallèle à la voie de chemin de fer et à la route. Le jet fire s'arrête lorsqu'il n'y a plus de propane liquide dans la conduite (vidange totale ou bien fermeture de vanne)
- Inflammation retardée
 - o Rejet en spray
 - Evaporation flash d'une partie du liquide : L'évaporation flash du liquide correspond au changement de phase spontané du propane liquide suite à la différence entre la pression de travail et la pression atmosphérique. Cette étape génère un nuage de gaz. A la fin de cette étape, le propane liquide (s'il en reste) est à la température d'ébullition à la pression atmosphérique
 - Aérosol : La partie de liquide qui n'a pas flashé se retrouve sous forme de fines gouttelettes. Ces gouttelettes s'évaporent durant leur chute vers le sol
 - Formation d'une nappe liquide : Les gouttelettes ne s'étant pas complètement évaporées chutent au sol et forment une nappe de propane liquide dont la température est la température d'ébullition à la pression ambiante.
 - o Création d'un nuage de gaz : Le nuage de gaz créé par la fuite se disperse dans le local des turbines. La concentration du gaz dans le nuage n'est pas homogène, de ce fait, la Limite Inférieure d'explosivité peut être atteinte
 - o Explosion : Une source d'inflammation efficace enflamme le nuage de gaz
 - Effets de surpression
 - Destruction de matériel
 - Victimes suite à l'onde de surpression, projectiles, bris de verre
- Passage d'un train
- Présence de visiteurs
- Pas d'inflammation :
 - o Le nuage explosible se disperse. La concentration à l'intérieur devient inférieure à la concentration minimale permettant une inflammation. La dispersion ne provoque pas de victimes.

Fuite continue au niveau de la citerne de 50m³ :

- Inflammation immédiate :
 - Création d'un jet fire. Le feu est dirigé dans l'axe de la conduite puisqu'il s'agit d'une rupture guillotine. Le jet fire s'arrête lorsqu'il n'y a plus de propane liquide dans la conduite (vidange totale ou bien fermeture de vanne)
- Inflammation retardée
 - Rejet en spray
 - Evaporation flash d'une partie du liquide : L'évaporation flash du liquide correspond au changement de phase brutal du propane suite à la différence entre la pression de travail et la pression atmosphérique. Cette étape génère un nuage de gaz. A la fin de cette étape, le propane liquide (s'il en reste) est à la température d'ébullition à la pression atmosphérique
 - Aérosol : La partie de liquide qui n'a pas flashé se retrouve sous forme de fines gouttelettes. Ces gouttelettes s'évaporent durant leur chute vers le sol
 - Formation d'une nappe liquide : Les gouttelettes ne s'étant pas complètement évaporées chutent au sol et forment une nappe de propane liquide. La température de la nappe est la température d'ébullition à la pression ambiante.
 - Création d'un nuage de gaz : Le nuage de gaz créé par la fuite se disperse et la concentration du gaz dans le nuage n'est pas homogène. De ce fait, la Limite Inférieure d'explosivité peut être atteinte
 - Explosion : Une source d'inflammation efficace enflamme le nuage de gaz
 - Effets de surpression
 - Destruction de matériel
 - Victimes suite à l'onde de surpression, projectiles, bris de verre
- Passage d'un train
- Présence de visiteurs
- Pas d'inflammation :
 - Le nuage explosible se disperse. La concentration à l'intérieur devient inférieure à la concentration minimale permettant une inflammation. La dispersion ne provoque pas de victimes.

Fuite continue au niveau de la pompe

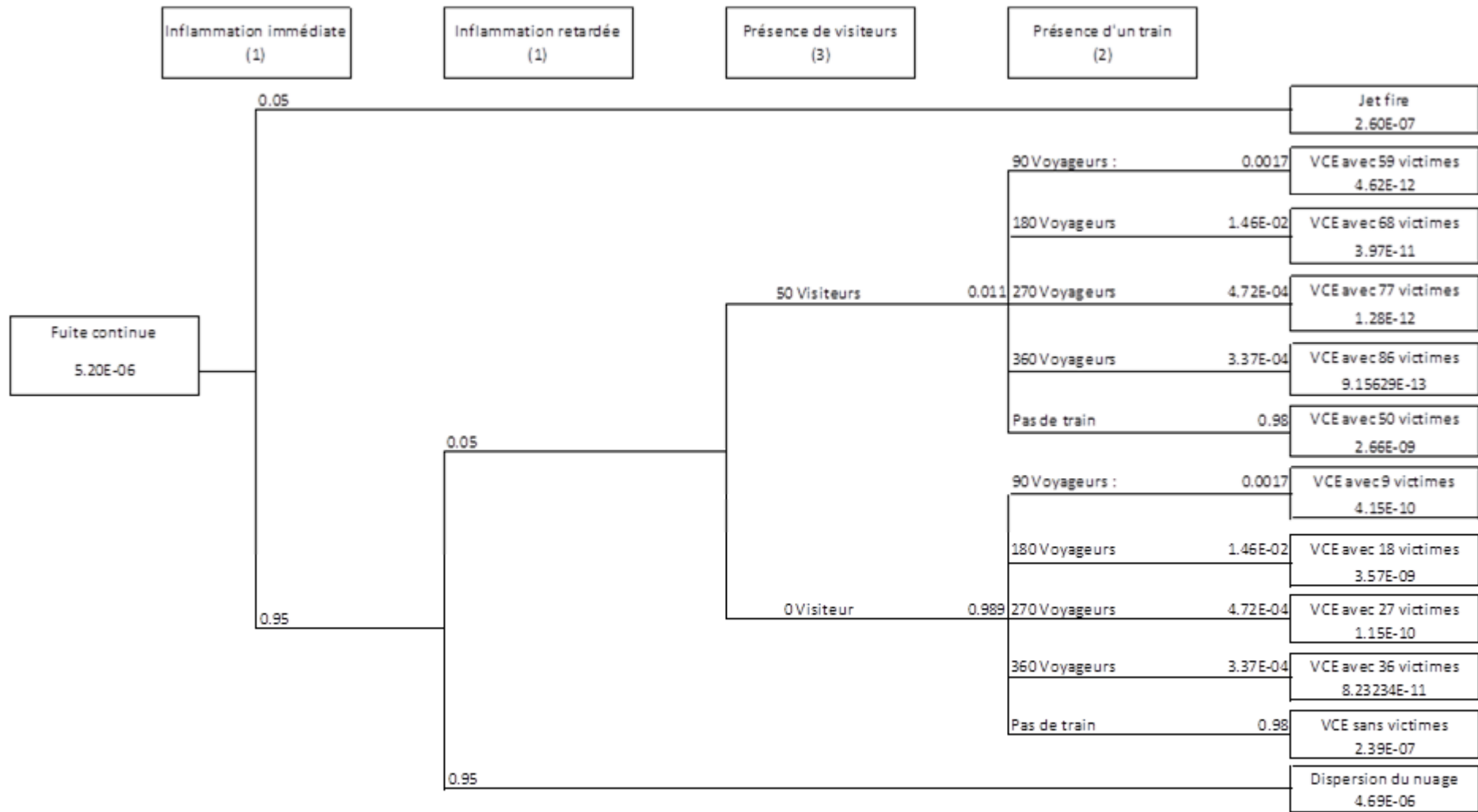


Figure 20 : arbre de conséquences d'une fuite continue au niveau des pompes

Fuite continue au niveau de la citerne de 50m³ :

Deux arbres de défaillance sont construits. Ils concernent les fréquences de présence de visiteurs sur le site. Il est supposé que la consigne selon laquelle les visiteurs sont interdits sur le site durant la période de maintenance est respectée à 99% du temps. Les fréquences de décès de visiteurs durant la phase de remplissage de la citerne sont données dans l'arbre suivant. La fréquence de fuite continue correspond à la fréquence globale déterminée dans l'arbre des causes précédent.

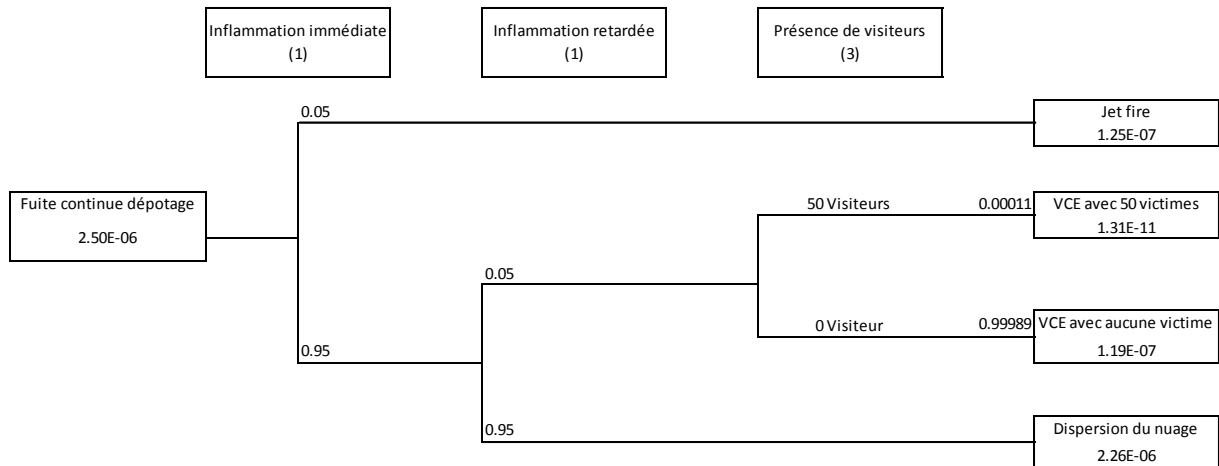


Figure 21 : arbre des événements fuite lors du dépotage

La rupture de la soupape de sécurité peut se produire en dehors des périodes de maintenance. Il faut donc considérer le cas où cet accident se produit durant une visite. La fréquence de l'événement initial correspond à la fréquence identifiée pour la branche « Fuite de la citerne » de l'arbre des causes puisqu'il n'y a pas de dépotage à ce moment. La fréquence de l'événement initial est donc égale à 2×10^{-7} cas par an.

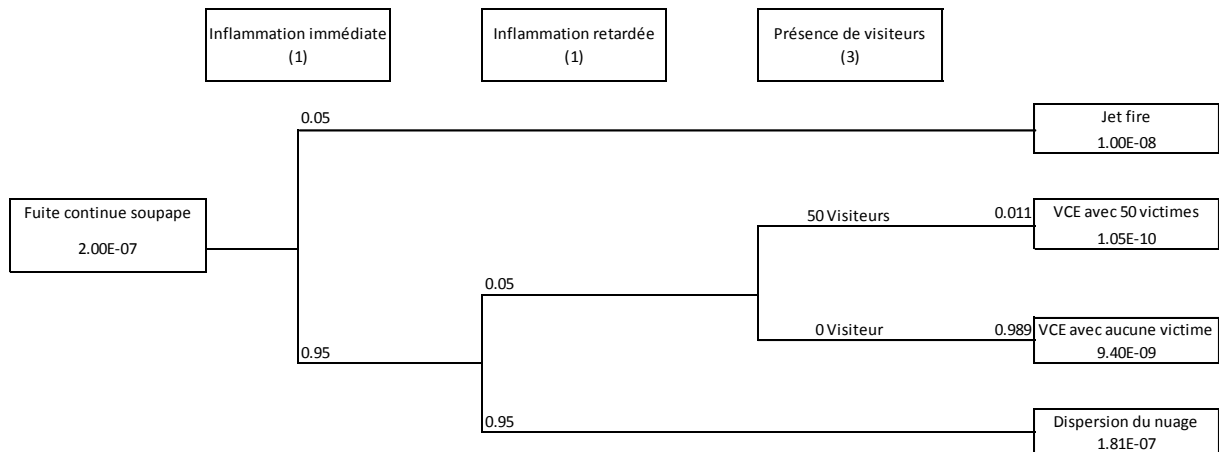


Figure 22 : arbre d'événement / Fuite en dehors de la période de maintenance

11.5.4 Justification de la valeur des probabilités d'événements

1. Inflammation immédiate et retardée : Selon le rapport cadre, (Rapport cadre « Stockage de gaz liquéfié » 1ère édition française, Basler & Hofmann, (1995)) il est recommandé d'utiliser les probabilités suivantes :

Inflammation immédiate du gaz (fuite continue) : 0.05
Inflammation retardée du gaz (fuite continue) : 0.05

2. Passage d'un train : Les probabilités de passage d'un train en fonction du nombre de voyageur sont extraites du rapport de M. Jean Marc Vaucher de Swissi (annexe 6).

3. Présence de visiteurs : 50 visiteurs peuvent se trouver 2h par semaine sur le site hors des phases de maintenance. La probabilité que des visiteurs se trouvent sur le site au moment d'une explosion est déterminée de la façon suivante :

$$p = \frac{\text{Heures passées sur site}}{\text{heures dans une année}} = \frac{2 \times 52}{8766} = 0.011$$

On suppose que la consigne d'absence des visiteurs lors d'une phase de maintenance est respectée à 99%. La fréquence de la présence de visiteurs simultanément à une période de maintenance est donc de 1.1×10^{-4} cas par an. Le site est équipé d'une alarme sonore devant être enclenchée en cas de risque d'explosion. Afin de rester dans une approche conservatrice, il est considéré que les visiteurs n'ont pas le temps d'évacuer.

11.6 Modélisation des conséquences des scénarios d'accident

Le fluide caloporteur sera soit :

- Du propane
- De l'isobutane
- De l'isopentane

Dans la mesure où le propane est le produit le plus inflammable, les simulations sont réalisées sur la base de ce produit.

11.6.1 Rupture catastrophique de la citerne de 50m³

Ce scénario n'est pas modélisé car la fréquence de l'accident est 1 million de fois inférieure à la fréquence minimale considérée par l'OPAM lors de l'étude des conséquences d'accidents majeurs (10^{-17} contre 10^{-11}).

11.6.2 Cas 1, fuite continue sur une conduite de la pompe ou la citerne, conséquences

La modélisation des deux événements implique le même enchaînement de phénomènes. Dans un premier temps, le débit de fuite est déterminé. Cette grandeur sert à déterminer la fraction de liquide qui flashe et le cas échéant la taille de la nappe formée qui s'évapore et se disperse simultanément à la vidange de la cuve. La dernière partie de la modélisation permet d'établir les conséquences d'une inflammation du rejet. Deux phénomènes sont considérés : l'explosion et le jet fire.

Terme source

Selon les modélisations réalisées sous le logiciel Effects, les 11.2m³ de propane liquide contenu dans les condenseurs (Document TEC E0143 140604 ORC Anlagenvolumen fourni par la société Gec-co) s'écouleraient en 2 minutes (§11.8.2). Le débit de rejet maximal serait alors voisin de 60 kg/s. (Figure 23). Ce rejet se fait sous forme de spray. Les sprays de gaz liquéfié se composent d'une partie vapeur (flash thermodynamique) et d'une partie liquide (aérosol). Cet aérosol s'évapore lors de sa chute vers le sol. Les simulations indiquent que toutes les gouttelettes s'évaporent et qu'il n'y a pas de formation de nappe de propane liquide au sol (§ 11.8.3).

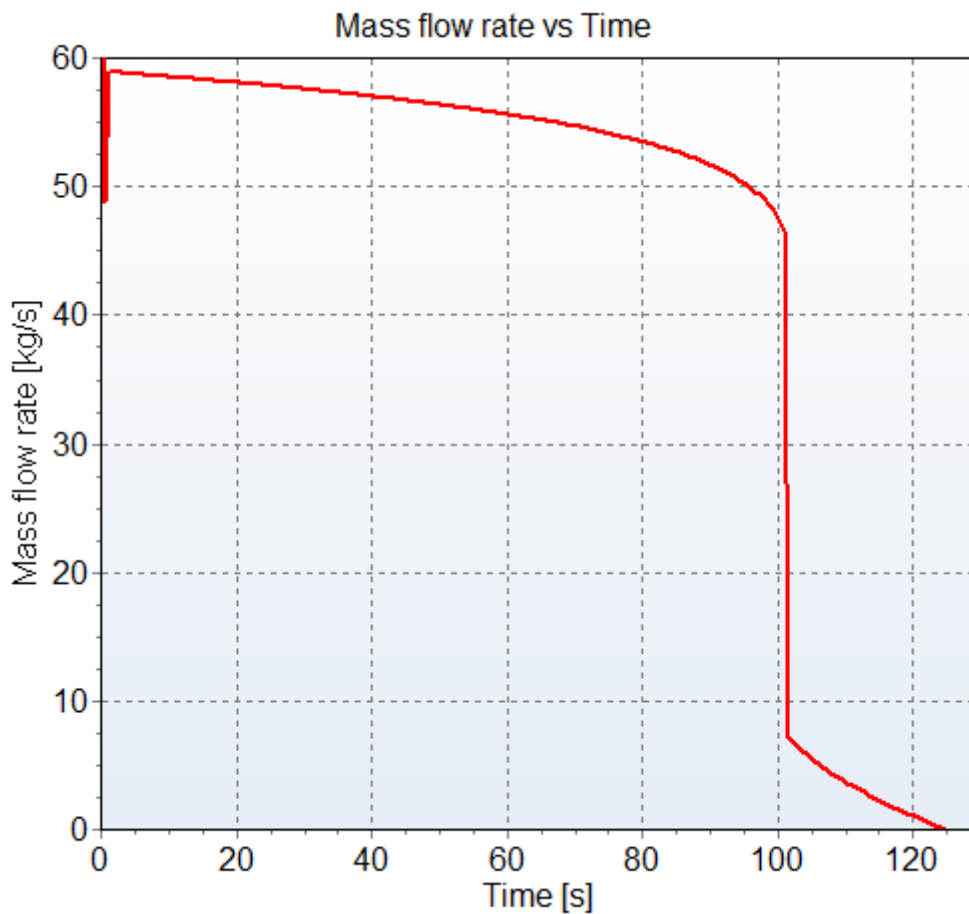
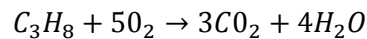


Figure 23 : Débit à la brèche.

Détermination de la concentration stœchiométrique

Les conséquences d'une explosion sont plus violentes lorsque les réactifs sont dans des conditions stœchiométriques. La réaction de combustion est alors complète et aucun sous-produit différent du CO₂ et de l'eau ne sont créés. Dans le cadre d'une approche conservatrice, les modélisations d'explosion se basent sur l'inflammation d'un mélange stœchiométrique. La réaction de combustion du propane est présentée équation 1 :

Equation 1: Equation de combustion



Le volume du bâtiment dans lequel le gaz se disperse est d'environ 3000m³. La quantité d'oxygène dans un local de 3000m³ est de :

Equation 2: Quantité de matière d'oxygène

$$n_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_M} = \frac{0.21 \times 3000}{0.024}$$
$$n_{O_2} = 26250 \text{ mol}$$

Où V_{O₂} est le volume d'oxygène (21% du volume d'air total) et V_M est le volume molaire (24 litres par mol à 20°C sous 1bar).

Selon l'équation de combustion (équation 1), il faut cinq fois moins de propane que d'oxygène pour se trouver dans des conditions stœchiométriques. La quantité stœchiométrique de propane est donc de 5250 moles. La masse correspondante de propane est donc :

Equation 3: Masse de propane dans les conditions stœchiométriques

$$m_{C_3H_8} = n_{C_3H_8} \times M_{C_3H_8} = 5250 \times 0.044$$
$$m_{C_3H_8} = 231 \text{ kg}$$

Les simulations portent donc sur l'inflammation de 231 kg de propane gazeux confinés dans un local de 3000m³.

Conséquences de l'inflammation

Les simulations d'explosion modélisent la détonation du mélange idéal de 231kg de propane avec de l'air dans un hangar de 3000m³. Ce scénario est conservateur sur deux points :

- La quantité de propane utilisée correspond à la quantité stœchiométrique du mélange air/propane. En réalité, la masse de propane réagissant étant plus importante, des sous-produits de combustion se formeront (à cause du manque d'oxygène) ce qui réduira la puissance de l'explosion.
- On suppose que l'inflammation provoque une détonation. Cette hypothèse est également conservatrice car il faudrait un fort encombrement dans la halle de la génératrice pour obtenir une détonation. Ce type d'explosion peut être évité si le toit du hangar est équipé d'évents de surpression. Dans ce cas-là, l'explosion reste une déflagration. Les deux cas sont traités :

- **Détonation**

Le seuil des effets impliquant des dégâts modérés aux structures (170mbar) est dépassé à l'extérieur du site (figure 24).

#=123456

■ Moderate damage

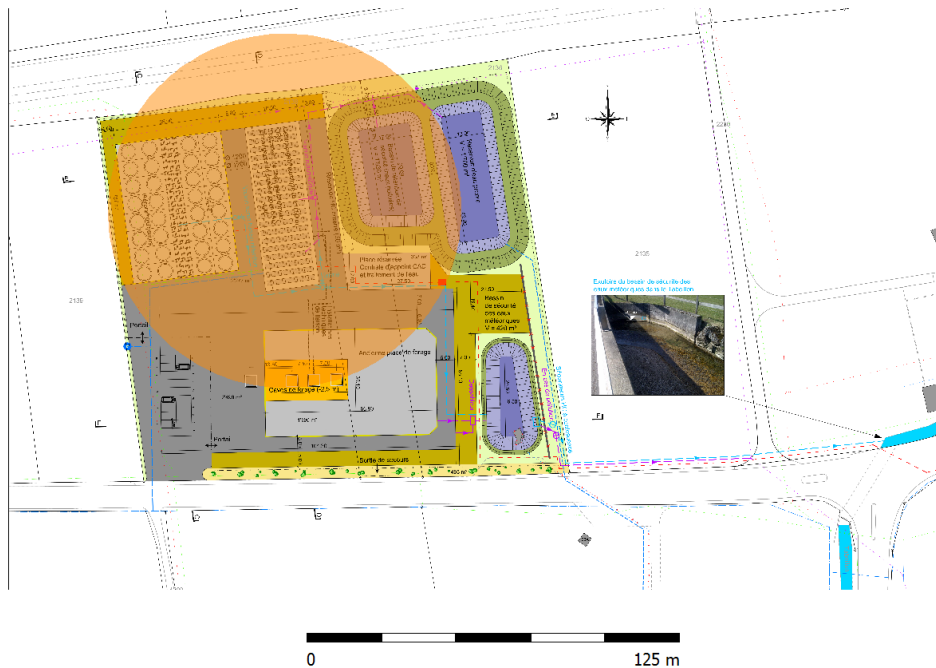


Figure 24 : limites des effets de dégâts moyens

On suppose également que si un train passe à cet instant, l'onde de choc le fera dérailler. Selon l'office Fédéral de statistiques Suisse (rapport annuel du service d'enquête suisse sur les accidents SESA [11], aucun décès n'a été recensé à l'intérieur d'un train en 2009, 2011 et 2012. En 2010, une seule personne est décédée (Les données de 2013 ne sont pas accessibles). Ceci signifie que même lors d'un déraillement de train, le taux de décès est très faible. Les décès peuvent être dus soit aux projections de bris de verre, soit au choc provoqué par le déraillement. Selon les simulations, les bris de glaces impliqueraient le décès de 5% des personnes présentes dans le train. (§11.8.5). Dans une approche conservatrice, il est considéré que 10% des voyageurs périssent en cas d'accident.

Les autres personnes extérieures au site pouvant être impactées sont les visiteurs. Le site peut en accueillir, deux heures par semaine toute l'année. Il est supposé que tous les visiteurs meurent si une explosion se produit en leur présence.

○ Déflagration

Selon le guide technique des dépôts de liquides inflammables (Guide de maîtrise des risques technologiques dans les dépôts de liquides inflammables, Groupe de travail Dépôts de liquides inflammables (GTDLI), (2008)), la modélisation d'une explosion, dans un bâtiment léger (bardage ou équipée de trappes de surpression) peut se faire à l'aide de la méthode multi-énergie en considérant une source d'inflammation de puissance 4 à 6. Les simulations sont réalisées à l'aide d'un terme source de puissance 4 pour tenir compte de l'installation de trappes de surpression sur le toit du local. Ces trappes sont dimensionnées pour que la pression réduite de l'explosion soit inférieure à 100mbar. Dans ces conditions, la déflagration ne génère pas d'onde de surpression capable de provoquer le déraillement d'un train et donc de victimes au niveau de la voie ferrée. De plus, les simulations (§11.8.7) indiquent que les bris de verre n'entraîneraient pas de victime non plus. Les visiteurs sur site seraient touchés s'ils se trouvent dans le local au moment de l'explosion. Le scénario de déflagration n'entraîne aucune victime hors du site.

○ **Jet Fire**

Le jet fire résultant d'une inflammation immédiate de la fuite se trouve dans le prolongement des conduites de propane liquide et donc orienté d'Ouest en Est. La figure 26 présente l'empreinte d'un tel jet fire. Selon les résultats des simulations de débit de fuite (11.8.2.), il dure environ 2 minutes. Puisqu'il est orienté parallèlement à la voie de chemin de fer et à la route, il ne provoque pas de victimes sur ces équipements.

= 123456

■ Flame area in XY plane (top view)

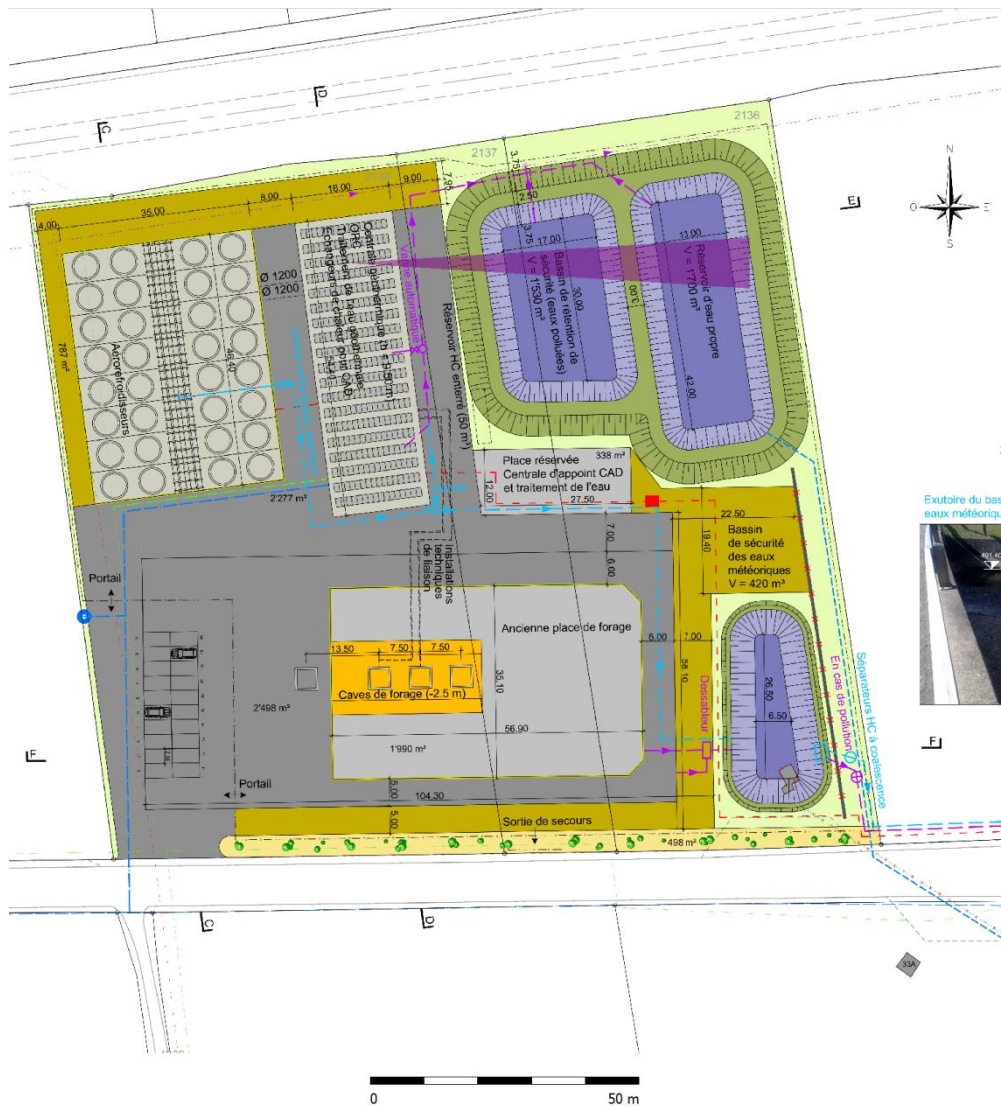


Figure 26: empreinte du jet fire

11.6.3 Cas 2, conduite de remplissage de la citerne, conséquences

Le second cas concerne la rupture de la conduite au poste de dépotage. La citerne de 50m³ de propane se vide alors complètement à l'air libre. Dans la mesure où cette citerne n'est employée que lors des phases de maintenance, il est possible de considérer que celle-ci est pleine 5% du temps. De plus, les pertes du système sont compensées une fois tous les 4 ans. Ces valeurs modifient en conséquence les fréquences d'apparition des causes de la fuite.

Terme source

Selon les résultats des modélisations, la citerne de 50m³ de propane se viderait en un peu plus de 10 minutes avec un débit pouvant approcher les 40 kg/s.

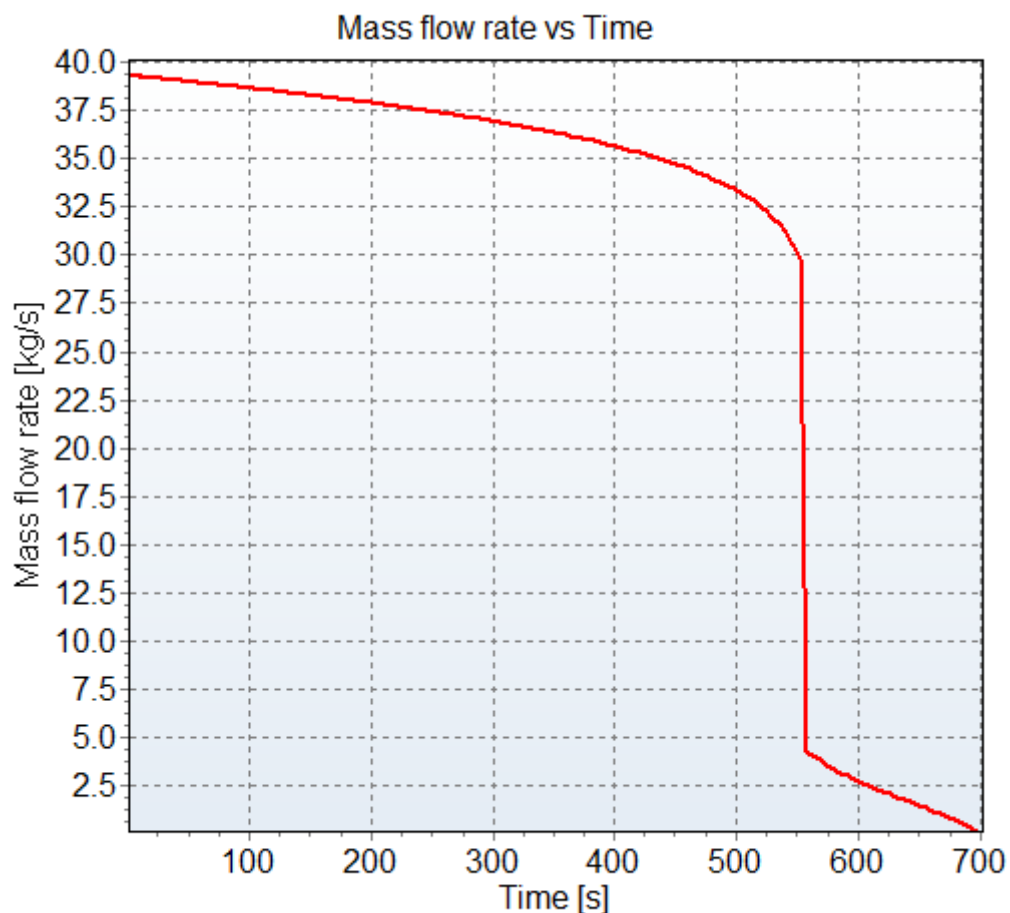


Figure 27 : Débit à la brèche

Le rejet est un jet diphasique. Comme lors du premier cas, les résultats des simulations indiquent que tout la partie liquide flashe, il n'y a donc pas de formation de nappe de propane liquide au sol (§11.8.8).

Dispersion

Puisque le rejet se produit à l'extérieur, le nuage se disperse. Deux cas sont traités selon si le vent vient du nord ou du sud pour déterminer les conséquences sur la route ou la voie

ferrée. La rose des vents est donnée au § 11.8.10. Les conditions de dispersion sont choisies pour favoriser les fortes concentrations et donc se placer dans le cas le plus conservateur du point de vue de la sécurité. C'est pourquoi la vitesse du vent est choisie faible (2 m/s) et la stabilité atmosphérique élevée (classe de Pasquill F). La figure 28 présente le contour des zones inflammables créées selon la direction du vent. Le nuage inflammable est représenté en orange lorsque le vent vient du sud et en bleu lorsqu'il vient du nord. Dans aucun des cas, il ne sort du site (11.8.11).



Figure 28 : empreinte des nuages explosibles selon la direction du vent (vent sud en orange, vent du nord en bleu)

Inflammation

Les conséquences de l'inflammation du nuage sont modélisées par la méthode multi énergie. Les résultats sont fonction de la puissance de la source d'inflammation. La puissance de l'inflammation est reportée sur une échelle de 1 à 10 où 1 représente une inflammation très faible et 10 une inflammation conduisant à une détonation. On suppose que la source d'inflammation est forte mais que le régime d'explosion reste une déflagration

dans la mesure où il n'y a pas de confinement. Les modélisations ont été réalisées avec une inflammation d'une puissance de 7 ce qui est la valeur conservatrice recommandée par le Yellow Book (Method for the calculation of Physical effects, TNO, (2005)) pour les inflammations accidentelles.

Les contours des zones dont la surpression dépasse les 170mbar sont représentés sur la figure 29. Contrairement au cas précédent, ni la route, ni la voie de chemin de fer ne sont impactées (§11.8.12). La modélisation des bris de verre indique aussi que ceux-ci ne sont pas assez puissants pour provoquer des victimes (§11.8.13). Ce scénario ne provoque donc pas de décès hors du site.

A #=123456 A=abcdef
■ ■ Overpressure plot

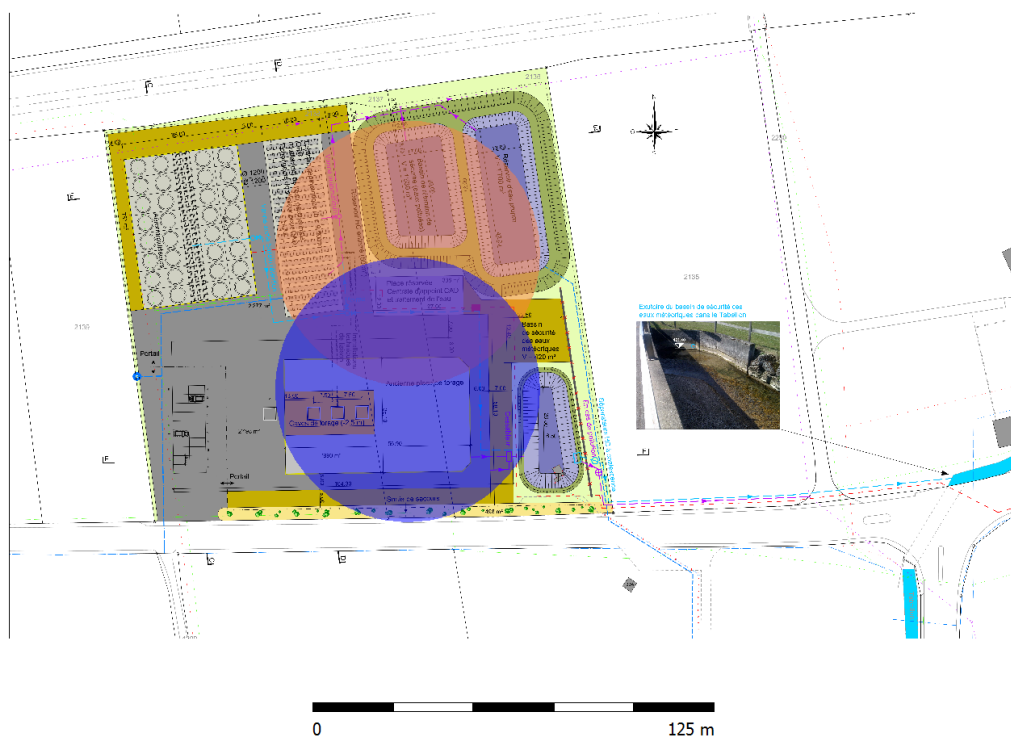


Figure 29 : zone dans laquelle la surpression est supérieure à 170 mbar

Les mesures de sécurité opérationnelles devront interdire toutes visites durant des travaux de maintenance. De ce fait, aucun visiteur ne devrait être présent sur site lors du remplissage de la citerne. Cependant si une explosion devait avoir lieu durant une visite, les 50 visiteurs devraient être considérés comme des victimes.

Jet fire

La modélisation d'un Jet fire indique que ce phénomène ne dépasserait pas les limites du site :

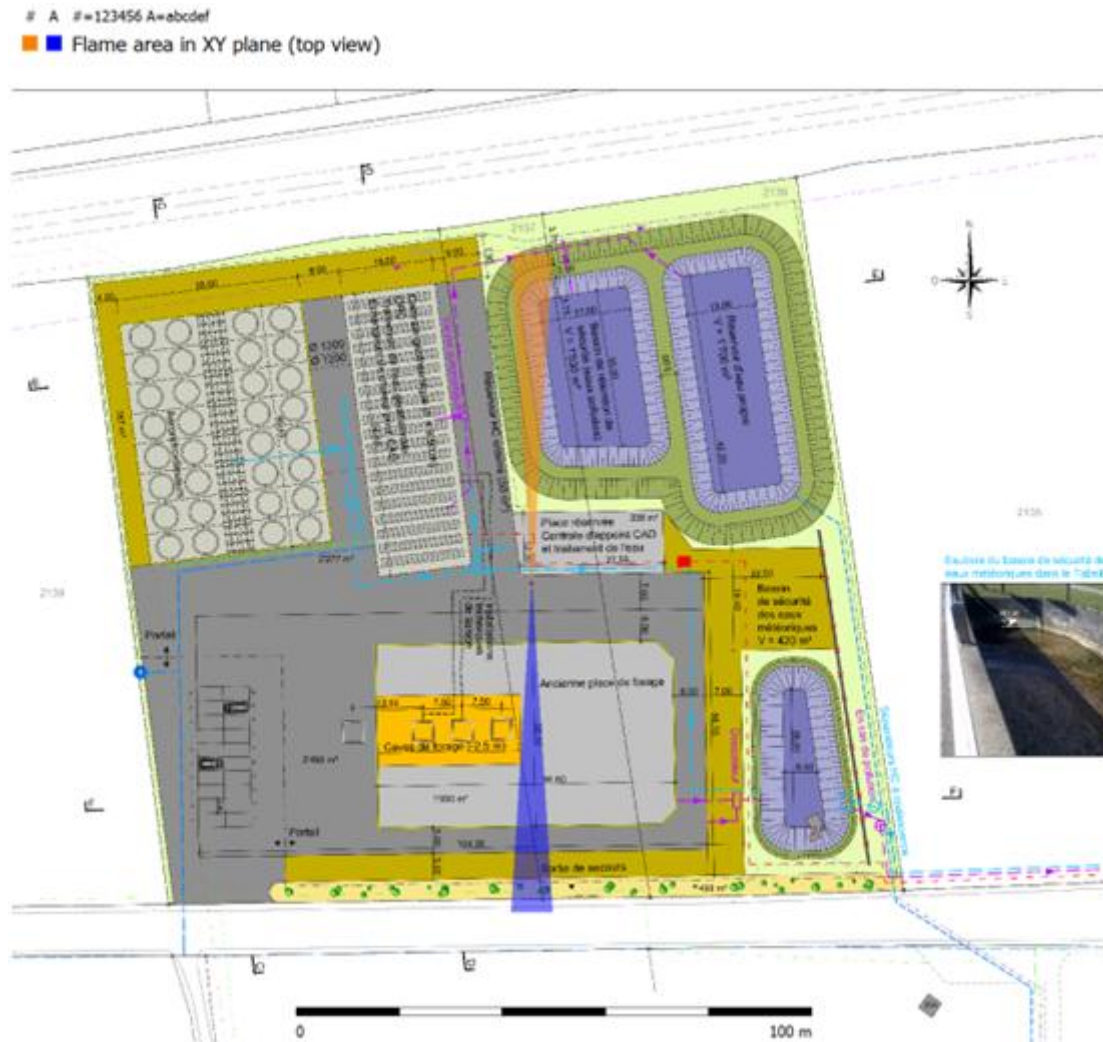


Figure 30 : jet fire selon la direction du vent (vent du sud en rouge, vent du nord en bleu)

11.6.4 Courbes cumulatives

Le tableau 5 présente les données nécessaires à la construction de la courbe cumulative. La première colonne présente le nombre total de victimes sur site et dans les trains (en supposant 10% de létalité dans les trains). La seconde colonne indique l'Indice d'Accident Majeur au sens de l'OPAM. La troisième colonne représente la fréquence déterminée dans l'arbre d'événements et la dernière colonne représente la fréquence cumulée.

	Victimes	IAM	Fréquence (cas/an)	Cumul (cas/an)
Fuite pompe	86	0.575	9.16×10^{-13}	9.15×10^{-13}
Fuite pompe	77	0.57	1.28×10^{-12}	2.20×10^{-12}
Fuite pompe	68	0.555	3.97×10^{-11}	4.19×10^{-11}
Fuite pompe	59	0.54	4.62×10^{-12}	4.65×10^{-11}
Fuite pompe	50	0.51	2.66×10^{-09}	2.71×10^{-09}
Fuite citerne durant maintenance	50	0.51	1.31×10^{-11}	2.72×10^{-09}
Fuite citerne hors maintenance	50	0.51	1.05×10^{-10}	2.82×10^{-09}
Fuite pompe	36	0.47	8.23×10^{-11}	2.91×10^{-09}
Fuite pompe	27	0.44	1.15×10^{-10}	3.02×10^{-09}
Fuite pompe	18	0.38	3.57×10^{-09}	6.59×10^{-09}
Fuite pompe	9	0.29	4.15×10^{-10}	7.00×10^{-09}

Tableau 5 : probabilité individuelle

La courbe cumulative est la suivante :

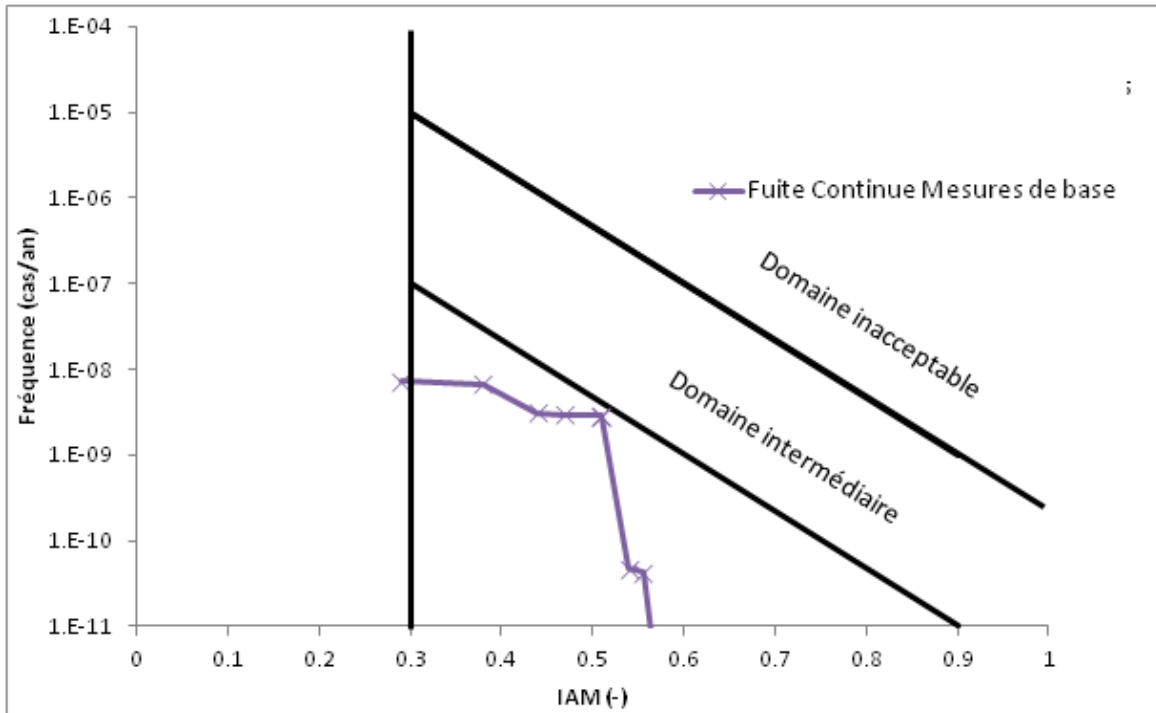


Figure 31 : courbe cumulative des effets

Le scénario reste dans le domaine acceptable malgré la proximité avec le domaine intermédiaire. Le pic au voisinage d'un IAM de 0.5 est dû aux 50 victimes qui surviendraient en cas d'explosion lors d'une visite du site sans présence de train. Il est possible de faire chuter cette fréquence d'un ordre de grandeur en employant des vannes de sectionnement redondantes. Il est aussi possible de diminuer l'IAM en diminuant le nombre de visiteurs pour chaque visite.

Sur la base de la présente étude de risque, la société Geo-Energie Suisse propose de mettre en œuvre deux mesures de sécurité supplémentaires :

- La mise en place de trappes de surpression pour s'assurer qu'une explosion dans le hangar de la génératrice reste une déflagration (Pression réduite <100mbar)
- Limiter à 25 le nombre de visiteurs.

Ces deux mesures modifient les conséquences et les fréquences d'occurrence des accidents.

La mise en place de trappes de surpression sur le toit du hangar de la génératrice permet de limiter les victimes aux visiteurs se trouvant dans ce hangar. Dans le cadre d'une approche conservatrice, il est considéré que tous les visiteurs sont dans le hangar au moment de l'explosion. Ces trappes sont des systèmes de sécurité passifs dont la fréquence de défaillance est nulle. Cependant leur efficacité peut être diminuée, par exemple en cas de présence de neige sur la trappe. Le site étant situé à Glovelier, il est considéré de manière conservatrice que ces trappes sont encombrées 70 jours par an, soit 19% du temps.

La diminution du nombre de visiteurs sur site impacte directement l'indice d'accident majeur.

La fréquence d'occurrence d'un accident mettant en cause une fuite sur la pompe, la présence de visiteurs sur site et le fonctionnement des trappes de surpression doit être implémentée :

$$f = 5.3 \times 10^{-6} \times 0.95 \times 0.05 \times 0.011 \times 0.81 = 2.36 \times 10^{-9}$$

Le tableau 5 est ainsi modifié :

	Victimes	IAM	Fréquence (cas/an)	Cumul (cas/an)
Fuite pompe	61	0.54	1.77×10^{-13}	1.77×10^{-13}
Fuite pompe	52	0.515	2.48×10^{-13}	4.26×10^{-13}
Fuite pompe	43	0.48	7.68×10^{-12}	8.11×10^{-12}
Fuite pompe	36	0.45	1.59×10^{-11}	2.40×10^{-11}
Fuite pompe	34	0.45	8.94×10^{-13}	2.49×10^{-11}
Fuite citerne durant maintenance	27	0.43	2.23×10^{-11}	4.73×10^{-11}
Fuite citerne hors maintenance	25	0.42	5.16×10^{-10}	5.63×10^{-10}
Fuite pompe	25	0.42	1.31×10^{-11}	5.76×10^{-10}
Fuite pompe	25	0.42	1.05×10^{-10}	6.81×10^{-10}
Fuite pompe	25	0.42	2.24×10^{-9}	2.92×10^{-9}
Fuite pompe	18	0.38	6.91×10^{-10}	3.61×10^{-9}
Fuite pompe	9	0.29	8.04×10^{-11}	3.7×10^{-9}

La courbe cumulative est modifiée en conséquence :

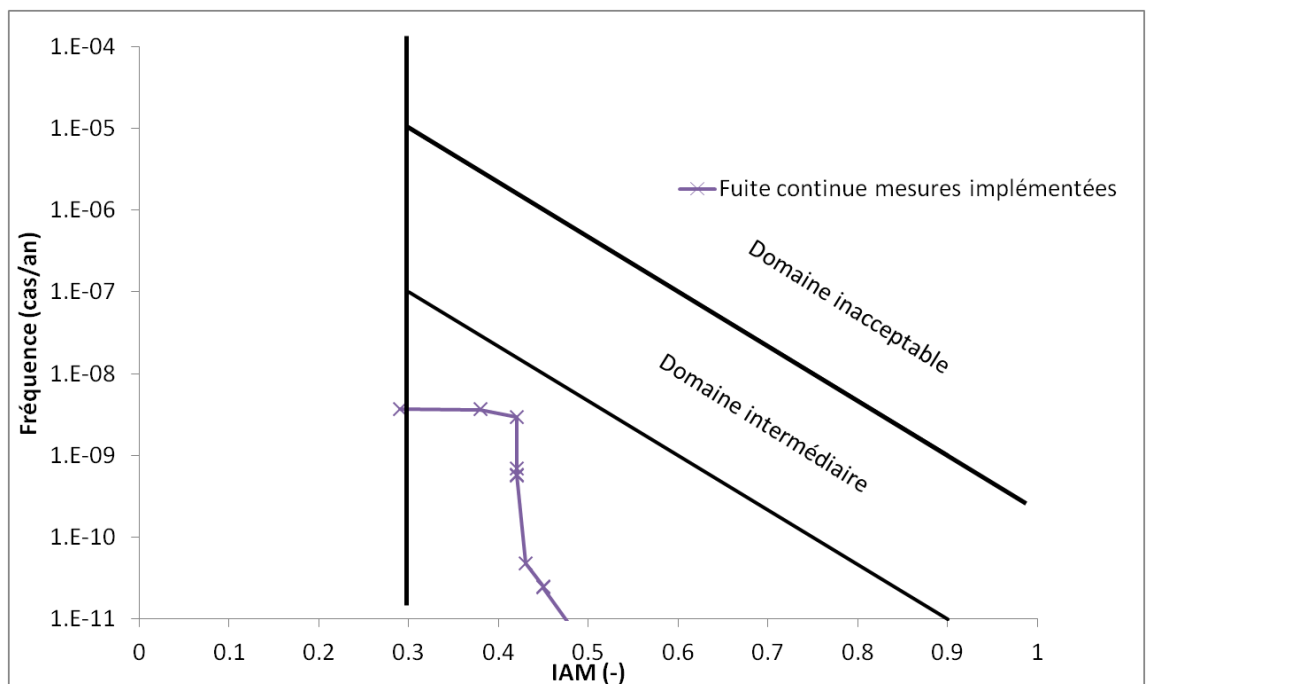


Figure 32 : courbe cumulative des effets

11.7 Conclusion de l'analyse de risques

Le projet de Geo-Energie Suisse est situé au voisinage d'une route cantonale et d'une voie ferrée. L'étude de risques est nécessaire pour connaître dans quelles mesures ces deux axes seraient impactés par un accident majeur.

L'étude de risque se base sur les scénarios recommandés par le rapport cadre de l'OFEV (Rapport cadre « Stockage de gaz liquéfié » 1ère édition française, Basler&Hofmann, (1995)) portant sur les stockages de gaz liquéfiés sous pression. Dans la mesure où le fluide caloporteur devant être employé sera soit du propane, soit du butane ou soit de l'isopentane, les simulations sont réalisées sur la base du propane dans la mesure où il s'agit du produit le plus facilement inflammable. Les deux scénarios prévoient une perte de confinement du propane liquide mais de deux manières différentes:

- Une rupture catastrophique de la citerne de stockage
- Une fuite continue soit au niveau des pompes soit au niveau des flexibles lors du remplissage de la citerne de propane liquéfié.

La fréquence d'apparition d'une rupture catastrophique de la citerne de propane liquéfié est inférieure à 10^{-11} cas par an. Elle est donc inférieure à la fréquence minimale considérée dans le cadre des études OPAM. Le second scénario est divisé en deux cas

1. Une rupture guillotine des conduites au niveau des pompes
2. Une rupture guillotine des conduites au niveau des flexibles de dépotage lors du remplissage de la citerne.

La simulation des conséquences d'une fuite continue au niveau des pompes conduit à la formation d'un nuage explosif dans ce local. Les simulations d'une détonation indiquent que des surpressions supérieures à 170 mbar peuvent être anticipées au niveau de la voie ferrée. Cet ordre de grandeur de surpression correspond à des dégâts modérés sur des structures. On suppose donc qu'une onde de surpression de plus de 170 mbar serait capable de faire dérailler un train. Les victimes provoquées par ce déraillement tiennent compte des bris de verre provoqués par le souffle et des statistiques de l'office fédéral suisse sur les victimes d'accidents ferroviaires. Celles-ci mettent en évidence le faible nombre de voyageurs tués lors d'un accident mettant en cause ce moyen de transport (déraillement, collision). On considère alors que 10% des personnes se trouvant dans le train périssent dans l'accident. De plus, en cas de visite sur le site de 50 personnes, celles-ci seraient tuées. Malgré le nombre de victimes, les fréquences d'occurrence de cet accident restent suffisamment faibles pour que la courbe reste dans le domaine acceptable. Les fréquences pourraient être réduites en créant une redondance au niveau des vannes de sectionnement des conduites menant aux pompes. Cette redondance doit se comprendre comme une redondance au niveau des capteurs, de la chaîne d'acquisition, du calculateur et de l'actionneur.

Il est possible de ne pas provoquer de victimes au niveau de la voie ferrée si l'explosion est une déflagration. Ceci sera le cas si des trappes de surpression sont installées sur le toit et les parois du hangar pour limiter la pression maximale. Dans une approche conservatrice, il est supposé que tous les visiteurs se situent dans ce local au moment de l'explosion. Ils sont donc considérés comme des victimes.

Il est possible de réduire les conséquences en termes de vies humaines en diminuant le nombre de visiteurs (de 50 à 25).

De même, selon les simulations, le cas de la rupture guillotine des conduites lors du remplissage de la citerne ne provoque pas de décès hors du site. Seuls les visiteurs pourraient être touchés. Sous les conditions d'accroissement du niveau de sécurité des vannes d'isolement, les fréquences pourraient être réduites d'un ordre de grandeur et la courbe cumulative aurait l'allure suivante :

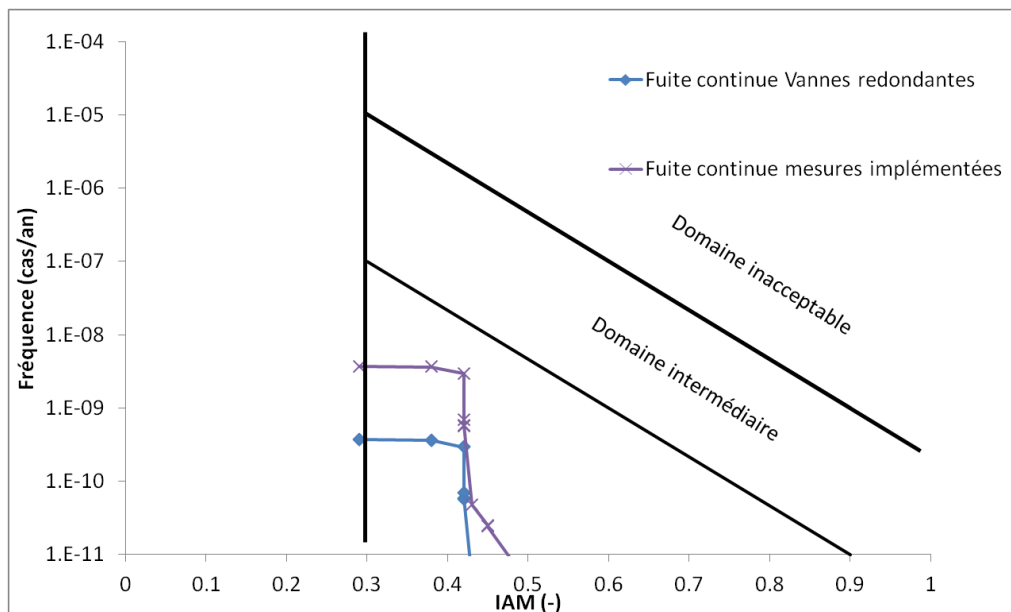


Figure 33 : courbes cumulatives des effets

11.8 Données complémentaires

11.8.1 Risque sismique



Figure 33 : carte des zones sismiques en Suisse. Le canton du Jura est classé Zone 1 [14]

11.8.2 Débit de fuite

Model: Liquefied Gas Bottom Discharge (TPDIS model)

version: 5.06 (24.06.2014)

Reference: Yellow Book (CPR-14E), 3rd edition 1997, Chapter 2 and Modelling source terms for the atmospheric dispersion of hazardous substances, Jaakko Kukkonen

Parameters

Inputs

Chemical name (YAWS)	PROPANE (YAWS)
Use which representative step	First 20% average (flammable)
Type of release	Release from vessel through (a hole in) pipe
Pipeline length (m)	60
Pipeline diameter (mm)	131
Pipeline roughness (mm)	0.045
Hole diameter (mm)	131
Hole rounding	Sharp edges
<i>Discharge coefficient (-)</i>	0.62
Height difference between pipe entrance and exit (m)	8.235
Height leak above tank bottom (m)	0
Initial temperature in vessel (°C)	20
Vessel volume (m3)	11.2
Vessel type	Horizontal cylinder
Length cylinder (m)	47
Filling degree (%)	99.99
Expansion type	Adiabatic
<i>n value</i>	
Pressure inside vessel determination	Use actual pressure
Initial (absolute) pressure in vessel (bar)	16
Type of calculation	Calculate until device is empty
<i>Time t after start release (s)</i>	

Results

Initial mass in vessel (kg)	5618.4
Initial (vapour) pressure in vessel (bar)	16
Time needed to empty vessel (s)	124.6
<i>Massflowrate at end outflow (kg/s)</i>	0
Total mass released (kg)	5592.1
<i>Pressure in vessel at end outflow (bar)</i>	1.0151
<i>Temperature in vessel at end outflow (°C)</i>	-43.55
<i>VapourMass fraction at end outflow (%)</i>	100
<i>Liquid mass in vessel at end outflow (kg)</i>	0
<i>Vapour mass in vessel at end outflow (kg)</i>	26.262
<i>Height of liquid at end outflow (m)</i>	0
<i>Fillingdegree at end outflow (%)</i>	0
<i>Exit pressure at end outflow (bar)</i>	1.0151
<i>Exit temperature at end outflow (°C)</i>	-43.55
Maximum mass flow rate (kg/s)	170.21
Representative release rate (kg/s)	60.026
Representative outflow duration (s)	93
Representative temperature (°C)	2.8405
Representative pressure at exit (bar)	5.2261
Representative vapour mass fraction (%)	4.9583

Other information

Main program	Effects 8.1.8.6673
Chemical database	YAWS database
Chemical source	Purple book database
Chemical source date	22.07.1999

11.8.3 Spray release

Model: Liquefied Gas Spray Release

version: 5.05 (24.06.2014)

Reference: Yellow Book CPR14E, Page: 2.105 / 2.112, Section: 2.5.3.7 [Finite duration spray releases] / 2.5.3.8 [Instantaneous release of pressurised liquefied vapours]

Parameters

Inputs

Chemical name (YAWS)	PROPANE (YAWS)
Mass flow rate of the source (kg/s)	60.026
Exit temperature (°C)	2.8405
Exit pressure (bar)	5.2261
Exit vapour mass fraction (%)	4.9583
Hole diameter (mm)	131
Height leak above ground level (m)	1
Ambient temperature (°C)	9
Ambient relative humidity (%)	83

Results

AFTER FLASHING AND RAINOUT: liquid mass fraction (%)	65.528
Nett mass flow to air (jet) (kg/s)	60.026
Temperature jet/cloud (°C)	-42.25
Diameter jet/cloud (m)	0.18049
Nett mass flow rained out (kg/s)	0
Temperature of the pool (°C)	-42.25
Density of the airborne mass (kg/m3)	6.7129

Other information

Main program	Effects 8.1.8.6673
Chemical database	YAWS database
Chemical source	Purple book database
Chemical source date	22.07.1999

11.8.4 Equivalents TNT, détonation

Model: Explosion (TNT equivalency model)

version: 5.02 (24.06.2014)

Reference: Yellow Book 3rd edition (1997) Chapter 5, figure 5.6, (TNT blast correlation model)

Parameters

Inputs

Type of TNT model	Based upon energy
Chemical name (YAWS)	PROPANE (YAWS)
Total mass in cloud (kg)	233
Equivalency factor (%)	10
Fraction of flammable cloud confined (%)	100
Distance from release (Xd) (m)	44
Offset between release centre and cloud centre at time t _{mac} (m)	0
Threshold overpressure (mbar)	140
X-coordinate of release (m)	0
Y-coordinate of release (m)	0
Predefined wind direction	User defined
Wind comes from (North = 0 degrees) (deg)	270

Results

Peak overpressure at Xd (mbar)	269.97
Equivalent TNT mass (kg)	242.56
Damage (general description) at Xd	Moderate damage (Zone C: 17 - 35 kPa).
Damage to brick houses at Xd	Not habitable without major repair works. Partial roof failures, 25% of all brick walls have failed, serious damage to the remaining carrying elements. Damage to windowframes and doors (7-15 kPa).
Damage to structures (empirical) at Xd	Collapse of steel frames and displacement of foundation (20 kPa). Industrial steel self-framing structure collapsed (20-30 kPa). Cracking in empty oil-storage tanks (20-30 kPa). Slight deformation of a pipe-bridge (20-30 kPa). Large trees have fallen down (20-40 kPa). Walls made of concrete blocks have collapsed (15-20). Minor damage to steel frames (8-10 kPa). Connections between steel or aluminium ondulated plates have failed 7-14 kPa). The roof of a storage tank has collapsed (7 kPa).
Damage to windows (houses before 1975) at Xd (%)	100
Damage to windows (houses after 1975) at Xd (%)	100
Confined mass in explosive range (kg)	233
Dist. center mass of confined expl. cloud to study point (m)	44
Dist. center mass of cloud at threshold overpressure (m)	67.354

Other information

Main program	Effects 8.1.8.6673
Chemical database	YAWS database
Chemical source	Purple book database
Chemical source date	22.07.1999

11.8.5 Victimes dues aux fragments de vitres

Model: Explosion: consequences of glass fragments

version: 4.01 (24.06.2014)

Reference:

Parameters

Inputs

Peak overpressure (bar)	0.26997
Positive phase duration (ms)	200
Wave type	Pressure wave
Angle of incidence (deg)	0
Smallest span length window (m)	1
Largest span length window (m)	2
Smallest thickness window (mm)	30
Largest thickness window (mm)	30
Modulus in flexure (bar)	75000
Transverse contraction coefficient (%)	10
Density of glass (kg/m ³)	2600

Results

Mortality due to glass fragments impact (%)	5.6081
---	--------

Other information

Main program	Effects 8.1.8.6673
--------------	--------------------

11.8.6 Déflagration dans le local des pompes

Model: Explosion (Multi Energy model)

version: 5.03 (27.06.2014)

Reference: Yellow Book CPR14E 3rd Edition - Chapter 5: Vapour cloud explosions

Parameters

Inputs

Chemical name (YAWS)	PROPANE (YAWS)
Ambient pressure (bar)	1
Total mass in explosive range (kg)	233
Fraction of flammable cloud confined (%)	10
Curve number	7 (Strong deflagration)
Distance from release (Xd) (m)	50
Offset between release point and cloud centre (m)	10
Threshold overpressure (mbar)	170

Results

Confined mass in explosive range (kg)	23.3
Total combustion energy (MJ)	1072.1
Peak overpressure at Xd (mbar)	137.88
Peak dynamic pressure at Xd (mbar)	6.1428
Pressure impulse at Xd (Pa*s)	172.14
Positive phase duration at Xd (ms)	24.97
Dist. from center mass of cloud at threshold overpressure (m)	42.919

Blast-wave shape at Xd Shock Wave

Damage (general description) at Xd Minor damage (Zone D: 3.5 - 17 kPa).

Damage to brick houses at Xd Not habitable without major repair works. Partial roof failures, 25% of all brick walls have failed, serious damage to the remaining carrying elements. Damage to windowframes and doors (7-15 kPa).

Damage to typical American-style houses at Xd Minor damage. Comparable to a damage due to a storm; wooden walls fail, breakage of windows (7-10 kPa).

Damage to structures (empirical) at Xd Minor damage to steel frames (8-10 kPa). Connections between steel or aluminium ondulated plates have failed 7-14 kPa). The roof of a storage tank has collapsed (7 kPa).

Other information

Main program	Effects 8.1.8.6673
Chemical database	YAWS database
Chemical source	Purple book database
Chemical source date	22.07.1999

11.8.7 Victimes dues aux fragments de vitres

Model: Explosion: Consequences of glass fragments

version: 4.01 (27.06.2014)

Reference:

Parameters

Inputs

Peak overpressure (bar)	0.13788
Positive phase duration (ms)	24.97
Wave type	Pressure wave
Angle of incidence (deg)	0
Smallest span length window (m)	1
Largest span length window (m)	1.5
Smallest thickness window (mm)	5
Largest thickness window (mm)	5
Modulus in flexure (bar)	75000
Transverse contraction coefficient (%)	10
Density of glass (kg/m3)	2600

Results

Mortality due to glass fragments impact (%)	0
---	---

Other information

Main program	Effects 8.1.8.6673
--------------	--------------------

11.8.8 Débit de fuite

Model: Liquefied Gas Bottom Discharge (TPDIS model)

version: 5.06 (24.06.2014)

Reference: Yellow Book (CPR-14E), 3rd edition 1997, Chapter 2 and Modelling source terms for the atmospheric dispersion of hazardous substances, Jaakko Kukkonen

Parameters

Inputs

Chemical name (YAWS)	PROPANE (YAWS)
Use which representative step	First 20% average (flammable)
Type of release	Release from vessel through (a hole in) pipe
Pipeline length (m)	10
Pipeline diameter (mm)	93
Pipeline roughness (mm)	0.045
Hole diameter (mm)	93
Hole rounding	Sharp edges
<i>Discharge coefficient (-)</i>	0.62
Height difference between pipe entrance and exit (m)	0
Height leak above tank bottom (m)	0
Initial temperature in vessel (°C)	20
Vessel volume (m3)	50
Vessel type	Horizontal cylinder
Length cylinder (m)	10
Filling degree (%)	80
Expansion type	Adiabatic
<i>n value</i>	
Pressure inside vessel determination	Use vapour pressure
<i>Initial (absolute) pressure in vessel (bar)</i>	8.3582
Type of calculation	Calculate until device is empty
<i>Time t after start release (s)</i>	

Results

Initial mass in vessel (kg)	20219
Initial (vapour) pressure in vessel (bar)	8.3582
Time needed to empty vessel (s)	697.42
<i>Massflowrate at end outflow (kg/s)</i>	0
Total mass released (kg)	20101
<i>Pressure in vessel at end outflow (bar)</i>	1.0151
<i>Temperature in vessel at end outflow (°C)</i>	-43.429
<i>VapourMass fraction at end outflow (%)</i>	100
<i>Liquid mass in vessel at end outflow (kg)</i>	0
<i>Vapour mass in vessel at end outflow (kg)</i>	117.7
<i>Height of liquid at end outflow (m)</i>	0
<i>Fillingdegree at end outflow (%)</i>	0
<i>Exit pressure at end outflow (bar)</i>	1.0151
<i>Exit temperature at end outflow (°C)</i>	-43.429
Maximum mass flow rate (kg/s)	39.315
Representative release rate (kg/s)	38.972
Representative outflow duration (s)	516
Representative temperature (°C)	6.8701
Representative pressure at exit (bar)	5.8152
Representative vapour mass fraction (%)	3.8309

Other information

Main program	Effects 8.1.8.6673
Chemical database	YAWS database
Chemical source	Purple book database
Chemical source date	22.07.1999

11.8.9 Spray release

Model: Liquefied Gas Spray Release

version: 5.05 (24.06.2014)

Reference: Yellow Book CPR14E, Page: 2.105 / 2.112, Section: 2.5.3.7 [Finite duration spray releases] / 2.5.3.8 [Instantaneous release of pressurised liquefied vapours]

Parameters

Inputs

Chemical name (YAWS)	PROPANE (YAWS)
Mass flow rate of the source (kg/s)	38.972
Exit temperature (°C)	6.8701
Exit pressure (bar)	5.8152
Exit vapour mass fraction (%)	3.8309
Hole diameter (mm)	93
Height leak above ground level (m)	1

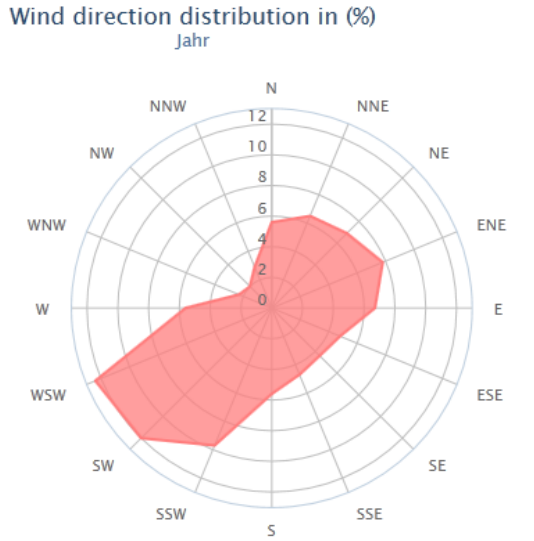
Results

AFTER FLASHING AND RAINOUT: liquid mass fraction (%)	63.356
Nett mass flow to air (jet) (kg/s)	38.972
Temperature jet/cloud (°C)	-42.25
Diameter jet/cloud (m)	0.17584
Nett mass flow rained out (kg/s)	0
Temperature of the pool (°C)	-42.25
Density of the airborne mass (kg/m ³)	6.3192

Other information

Main program	Effects 8.1.8.6673
Chemical database	YAWS database
Chemical source	Purple book database
Chemical source date	22.07.1999

11.8.10 Rose des vents de St-Ursanne



11.8.11 Dispersion atmosphérique

Model: Dense Gas Dispersion: Explosive mass

version: 5.13 (24.06.2014)

Reference: Yellow Book 3rd edition 1997 chapter 4; Ermak, D.L. User manual for SLAB Lawrence Livermore National Laboratory, June 1990

compared to: Propane scénario 2 N (linked to Liquefied Gas Spray Release - Propane scénario 2 (linked to Liquefied Gas Bottom Discharge (TPDIS model) - Propane scénario 2))

Parameters

Inputs	Propane scénario 2 (linked to Liquefied Gas Spray Release - Propane scénario 2 (linked to Liquefied Gas Bottom Discharge (TPDIS model) - PROPANE (YAWS))	Propane scénario 2 N (linked to Liquefied Gas Spray Release - Propane scénario 2 (linked to Liquefied Gas Bottom Discharge (TPDIS model) - PROPANE (YAWS))
Chemical name (YAWS)	PROPANE (YAWS)	PROPANE (YAWS)
Type of release	Horizontal Jet release	Horizontal Jet release
<i>Total mass released (kg)</i>		
Mass flow rate of the source (kg/s)	38.972	38.972
Duration of the release (s)	516	516
Initial liquid mass fraction (%)	0	0
<i>Fixed pool surface (m²)</i>		
Diameter of expanded jet (m)	0.17584	0.17584
Temperature after release (°C)	-42.25	-42.25
Z-coordinate (height) of release (m)	1	1
Pasquill stability class	F (Very Stable)	F (Very Stable)
Wind speed at 10 m height (m/s)	2	2
Roughness length description	High crops; scattered large objects, 15 < x/h < 20.	High crops; scattered large objects, 15 < x/h < 20.
Time t after start release (s)	1000	1000
Results	Propane scénario 2 (linked to Liquefied Gas	Propane scénario 2 N (linked to Liquefied Gas

	Spray Release - Propane scénario 2 (linked to Liquefied Gas Bottom Discharge (TPDIS model) - Propane scénario 2))	Spray Release - Propane scénario 2 (linked to Liquefied Gas Bottom Discharge (TPDIS model) - Propane scénario 2))
Explosive mass at time t (kg)	0	0
Height to LEL at time t (m)	0	0
Length of cloud (between LEL) at time t (m)	0	0
Width of cloud (between LEL) at time t (m)	0	0
Offset between release location and LEL at time t (m)	0	0
Maximum explosive mass (kg)	31.835	31.835
...at time tmem (s)	350	350
Start time where 95% of maximum of explosive mass is reached (s)	47.5	47.5
Time where explosive mass starts decreasing below 95% of max (s)	516	516
Length of cloud (between LEL) at time tmem (m)	37.45	37.45
Width of cloud (between LEL) at time tmem (m)	6.2901	6.2901
Offset between release location and LEL at time tmem (m)	2.4897	2.4897
Maximum area of explosive cloud (m ²)	184.52	184.52
...at time tmac (s)	516	516
Explosive mass at time tmac (kg)	31.835	31.835
Length of cloud (between LEL) at time tmac (m)	37.45	37.45
Width of cloud (between LEL) at time tmac (m)	6.2901	6.2901
Offset between release location and LEL at time tmac (m)	2.4897	2.4897
Offset between release centre and cloud centre at time tmac (m)	21.215	21.215
Inverse Monin-Obukhov length (1/L) used (1/m)	0.048833	0.048833
Other information		
Main program		Effects 8.1.8.6673
Chemical database		YAWS database
Chemical source		Purple book database
Chemical source date		22.07.1999

11.8.12 Explosion multi énergie

Model: Explosion (Multi Energy model)

version: 5.03 (24.06.2014)

Reference: Yellow Book CPR14E 3rd Edition - Chapter 5: Vapour cloud explosions

compared to: Propane scénario 2 N (linked to Dense Gas Dispersion: Explosive mass - Propane scénario 2 (linked to Liquefied Gas Spray Release - Propane scénario 2 (linked to Liquefied Gas Bottom Discharge (TPDIS model) - Propane scénario 2)))

Parameters

Inputs	Propane scénario 2 (linked to Dense Gas Dispersion: Explosive mass - Propane scénario 2 (linked to Liquefied Gas Spray Release - Propane scénario 2 (linked to Liquefied Gas Bottom Discharge (TPDIS model) - Propane scénario 2)))	Propane scénario 2 N (linked to Dense Gas Dispersion: Explosive mass - Propane scénario 2 (linked to Liquefied Gas Spray Release - Propane scénario 2 (linked to Liquefied Gas Bottom Discharge (TPDIS model) - Propane scénario 2)))
Chemical name (YAWS)	PROPANE (YAWS)	PROPANE (YAWS)
Ambient pressure (bar)	1.0151	1.0151
Total mass in explosive range (kg)	200	200
Fraction of flammable cloud confined (%)	10	10
Curve number	7 (Strong deflagration)	7 (Strong deflagration)
Distance from release (Xd) (m)	80	70
Offset between release point and cloud centre (m)	21.215	21.215
Threshold overpressure (mbar)	170	170
X-coordinate of release (m)	31.49262	31.49262
Y-coordinate of release (m)	-28.22253	-28.22253
Predefined wind direction	User defined	User defined
Wind comes from (North = 0 degrees) (deg)	180	0

Results	Propane scénario 2 (linked to Dense Gas Dispersion: Explosive mass - Propane scénario 2 (linked to Liquefied Gas Spray Release - Propane scénario 2 (linked to Liquefied Gas Bottom Discharge (TPDIS model) - Propane scénario 2)))	Propane scénario 2 N (linked to Dense Gas Dispersion: Explosive mass - Propane scénario 2 (linked to Liquefied Gas Spray Release - Propane scénario 2 (linked to Liquefied Gas Bottom Discharge (TPDIS model) - Propane scénario 2)))
Confined mass in explosive range (kg)	20	20
Total combustion energy (MJ)	920.26	920.26
Peak overpressure at Xd (mbar)	72.355	85.604
Peak dynamic pressure at Xd (mbar)	1.5287	2.1487
Pressure impulse at Xd (Pa*s)	94.49	109.99
Positive phase duration at Xd (ms)	26.119	25.696
Dist. from center mass of cloud at threshold overpressure (m)	41.007	41.007
Blast-wave shape at Xd	Shock Wave	Shock Wave
Damage (general description) at Xd	Minor damage (Zone D: 3.5 - 17 kPa).	Minor damage (Zone D: 3.5 - 17 kPa).
Damage to brick houses at Xd	Habitable after relatively easy repairs. Minor structural damage (3 kPa).	Habitable after relatively easy repairs. Minor structural damage (3 kPa).
Damage to typical American-style houses at Xd	Minor damage. Comparable to a damage due to a storm; wooden walls fail, breakage of windows (7-10 kPa).	Minor damage. Comparable to a damage due to a storm; wooden walls fail, breakage of windows (7-10 kPa).
Damage to structures (empirical) at Xd	Connections between steel or aluminium ondulated plates have failed 7-14 kPa). The roof of a storage tank has collapsed (7 kPa).	Minor damage to steel frames (8-10 kPa). Connections between steel or aluminium ondulated plates have failed 7-14 kPa). The roof of a storage tank has collapsed (7 kPa).
Other information		
Main program		Effects 8.1.8.6673
Chemical database		YAWS database
Chemical source		Purple book database
Chemical source date		22.07.1999

11.8.13 Victimes par fragments de vitres

Model: Explosion: consequences of glass fragments

version: 4.01 (24.06.2014)

Reference:

Parameters

Inputs

Peak overpressure (bar)	0.085604
Positive phase duration (ms)	25.696
Wave type	Pressure wave
Angle of incidence (deg)	0
Smallest span length window (m)	1
Largest span length window (m)	1.5
Smallest thickness window (mm)	5
Largest thickness window (mm)	5
Modulus in flexure (bar)	75000
Transverse contraction coefficient (%)	10
Density of glass (kg/m ³)	2600

Results

Mortality due to glass fragments impact (%)	0
---	---

Other information

Main program	Effects 8.1.8.6673
--------------	--------------------

12 Conclusions

Ce document et ses annexes permettent de voir les mesures constructives, techniques et organisationnelles prises pour la sécurité des personnes et du bâtiment. L'ensemble des mesures prises, en accord avec les normes et directives en vigueur, assurent les objectifs fixés.

Il est prévu de réduire le nombre de visiteurs de 50 à 25 afin de diminuer drastiquement les conséquences d'une explosion pendant une visite.

De plus, aucune opération de maintenance sur le circuit de l'ORC ne sera admise pendant les périodes de visite.

Dans les mesures importantes, il faut relever notamment la suppression de la détonation par la mise en place de clapets (ou tous autres systèmes équivalents) permettant de dissiper la surpression d'explosion et de garantir de ne pas dépasser la limite des 170 mbar.

Des mesures importantes de rétention sont prévues.

Sur la base de l'analyse de risque produite, de l'état de la technique, des mesures constructives, techniques et organisationnelles qui seront mises en place, des propriétés physicochimiques des substances considérées ainsi que des caractéristiques du site, il est possible d'admettre que le projet de centrale géothermique prévu par Geo-Energie Suisse présente un risque acceptable d'accident majeur.

Les documents existants suivants complètent le rapport :

- rapport succinct d'ESCO Conseil
- concept incendie de Swissi SA

Les documents suivants seront des compléments nécessaires à ce rapport :

- Concept ATEX
- SOP des installations
- Plan d'intervention.

Nous restons à votre entière disposition pour vous fournir les compléments d'information qui vous seraient nécessaires. Vous pouvez également nous contacter pour des problèmes dans les domaines de la sécurité au travail, de l'environnement, de l'intrusion, de l'explosion et de la formation.

Nous vous remercions de votre collaboration et vous souhaitons une activité pleine de succès et sans incendies.

Swissi SA



Valentin Cavicchiolo
Membre de la Direction

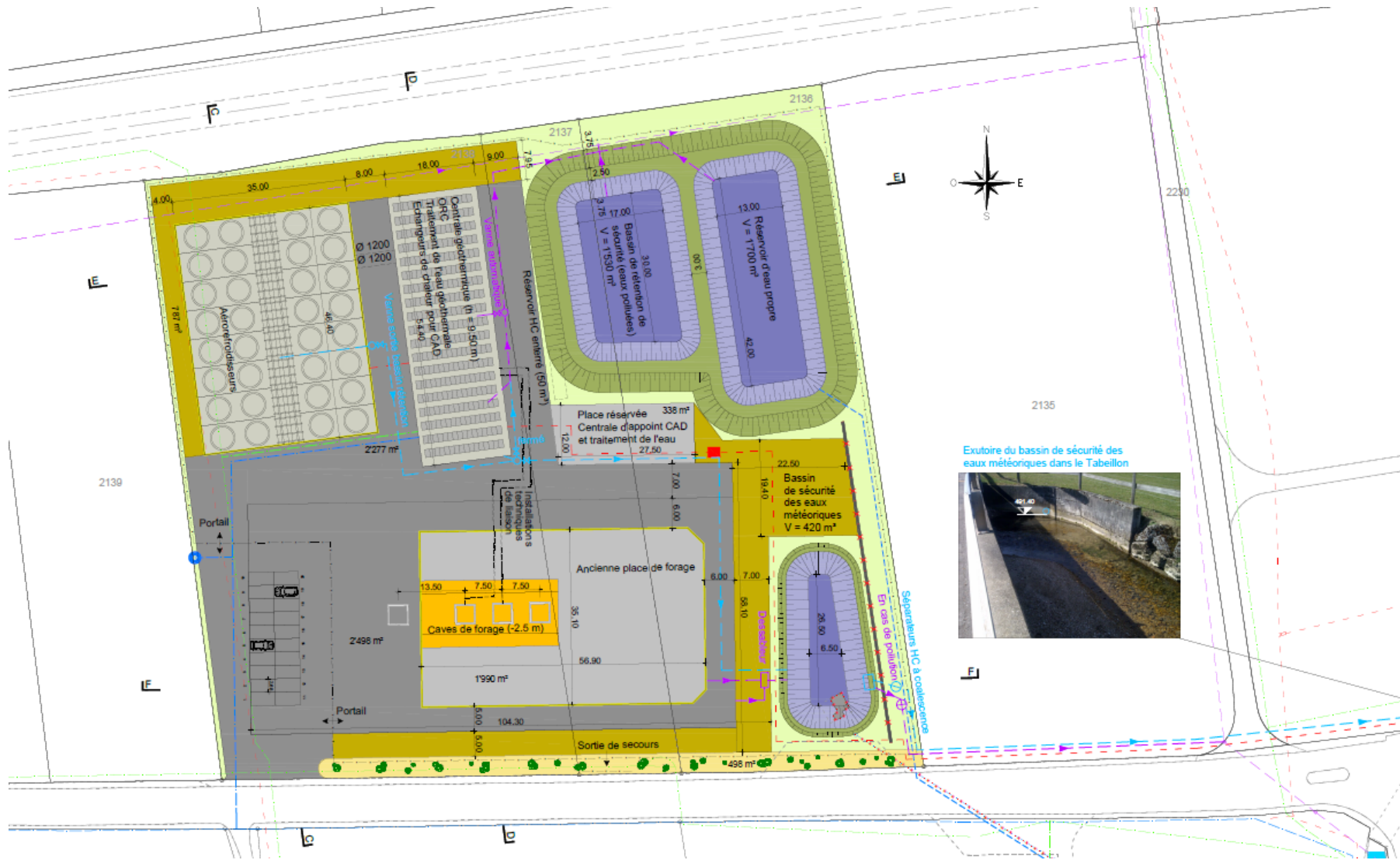


Dr Jean-Marc Vaucher
Spécialiste Protection Incendie

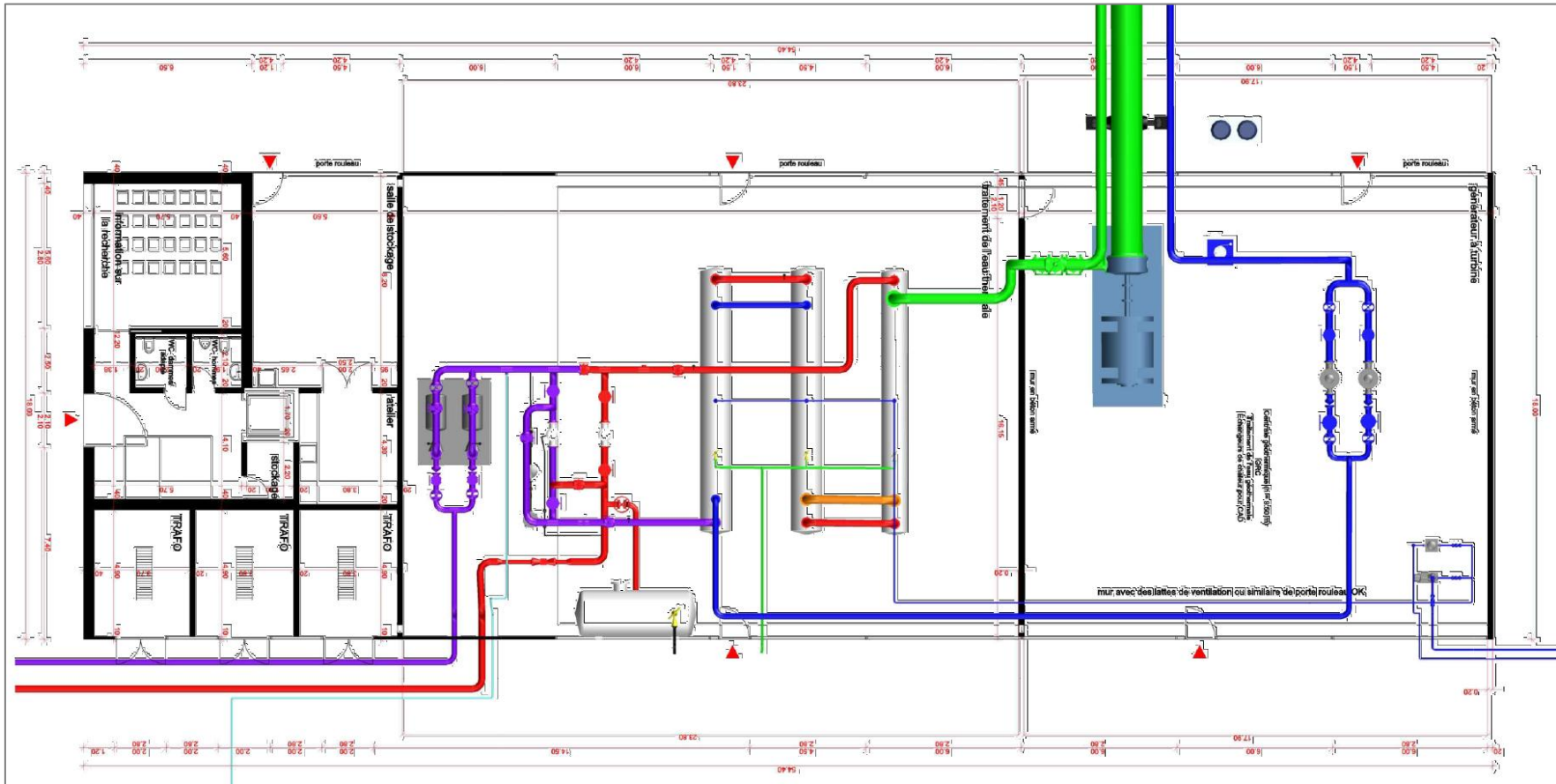
13 Bibliographie

- [1] ESCO Conseil Sàrl, rapport succinct, Régis Kottelat, 2014, Yverdon-les-Bains (CH).
- [2] Swissi SA, rapport protection incendie, Jean-Marc Vaucher, 2014, Neuchâtel (CH).
- [3] OFS / OFFP, Dangers naturels et accidents majeurs, Bern (CH).
- [4] Directive CFST 1941, Gaz liquéfiés 1^{ère} partie, 2005, Lucerne (CH).
- [5] Directive CFST 1942, Gaz liquéfiés 2^{ème} partie, 1997, Lucerne (CH).
- [6] Directive SUVA 2153, Prévention des explosions, principes, prescriptions minimales, zones, 2004, Lucerne (CH).
- [7] Guide pratique d'entreposage des matières dangereuses, Institut de sécurité et al., 2011, Frauenfeld (CH).
- [8] Swissi PS - Tüv Süd., analyse de risques, Pablo Lerena et Serge Forestier, 2014, Bâle (CH).
- [9] Rapport cadre « Stockage de gaz liquéfié », 1^{ère} édition française, Basler & Hofmann, 1995, Zürich (CH).
- [10] Valeurs limites d'exposition aux postes de travail 2014. VME/VLE, VBT valeurs admissibles pour agents physiques, SUVA 1903.f, 2014, Lucerne (CH).
- [11] Service d'enquête suisse sur les accidents SESA, Rapport annuel 2012, Bern (CH).
- [12] Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, GESTIS-Stoffdatenbank (D).
- [13] Air Liquide, fiches de données de sécurité (F).
- [14] Schweizerischer Ingenieur- und ArchitektenVerein, Norm sia 261, Einwirkungwenauf Tragwerke, Ausgabe 2003, Zürich (CH).
- [15] http://www.seismo.ethz.ch/prod/haz_map/index_EN
- [16] Ch. Engel, Gutachtliche Stellungnahme zur Erdbebensicherheit einer Rohrfernleitungsanlage zum Befördern wassergefährdender Stoffe, RWTüV, 2006, Essen (D).
- [17] DIBt, Berechnungsempfehlungen für zylindrische Behälter und Silos Berücksichtigung des Lastfalls Erdbeben, 40-B3, 2012, Berlin (D).
- [18] RWTHAachen, Erläuterungen zum Leitfaden der Lastfall Erdbeben im Anlagebau, 2012, Aachen (D).
- [19] OFEV, Substances problématiques - Solutions alternatives, 2007, Bern (CH).

Annexe 1 : plan du site



Annexe 2 : plan technique du bâtiment



Rez-de-chaussée du bâtiment technique, avec les différents flux représentés selon l'échelle de couleur ci-contre.

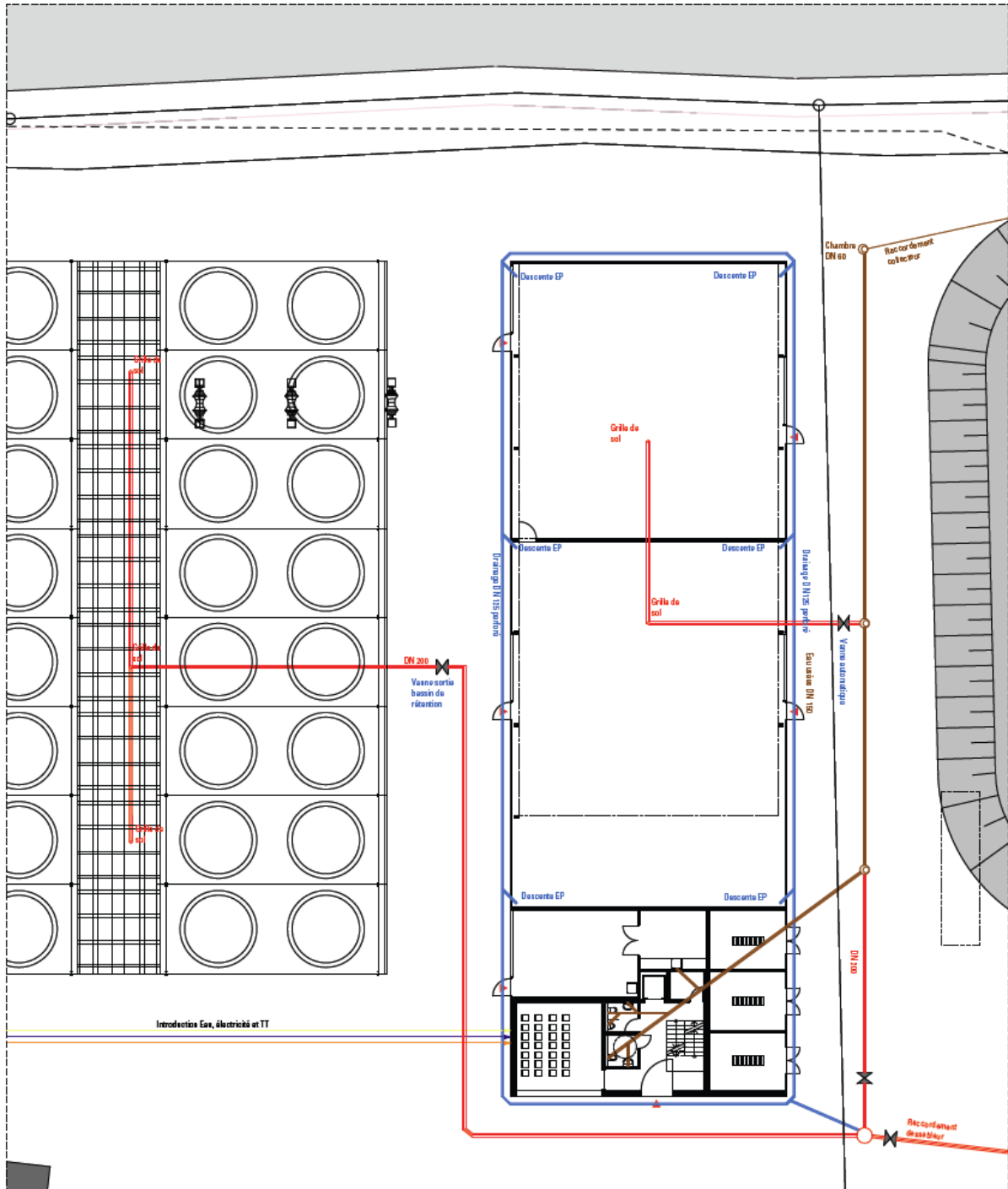
La turbine se trouve dans le local à droite sur le schéma

- Medien:
- Blau: Arbeitsmittel flüssig
 - Orange: Arbeitsmittel flüssig/dampfförmig (2-Phasen)
 - Grün: Arbeitsmittel dampfförmig
 - Rot: Thermalwasser ein (heiß)
 - Lila: Thermalwasser aus (kalt)
 - Grau: Fernwärme
 - Schwarz: Abwasser
 - Türkis: Speisewasser (kalt)
 - Braun: Stickstoff

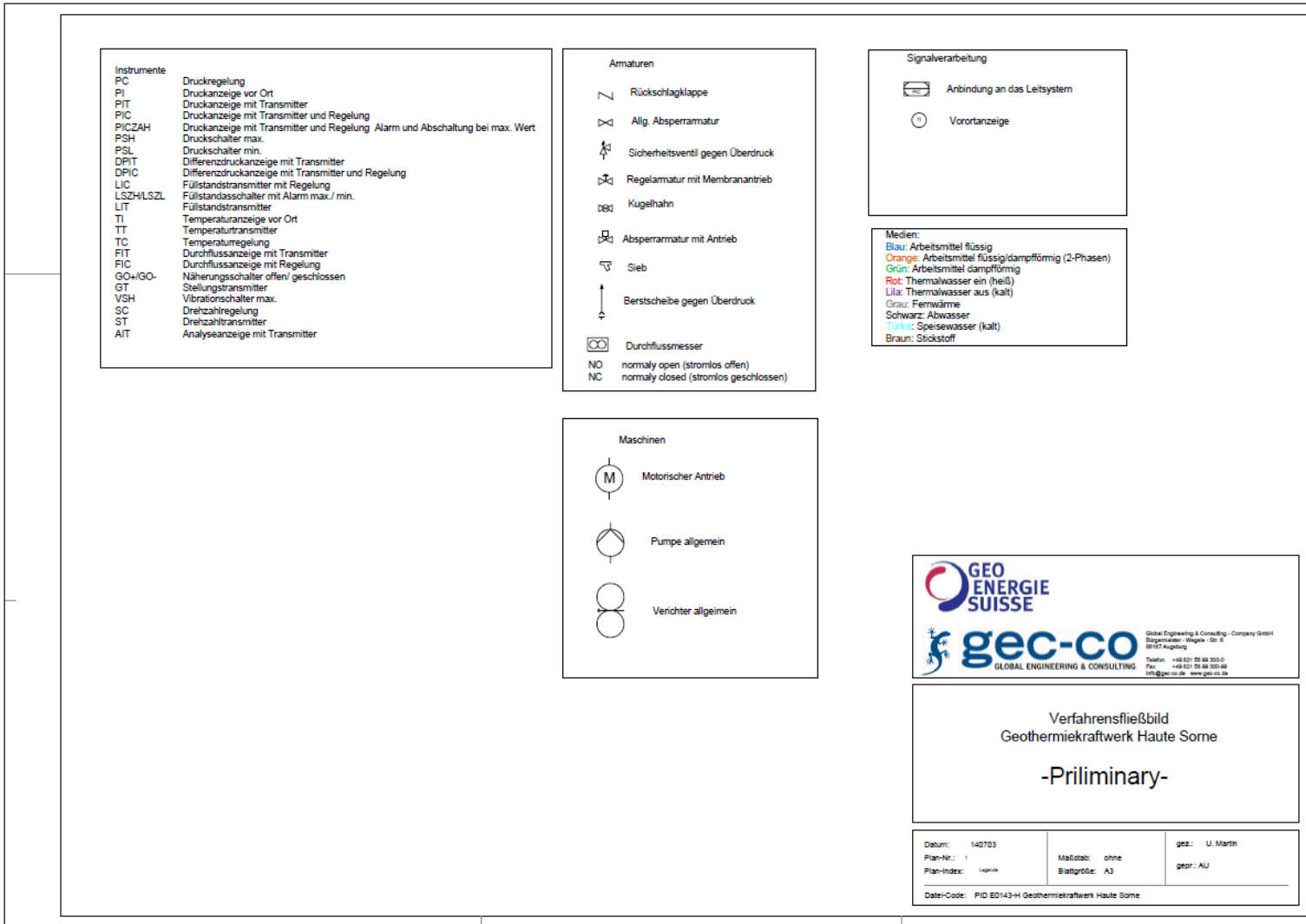
Annexe 3 : représentation des façades



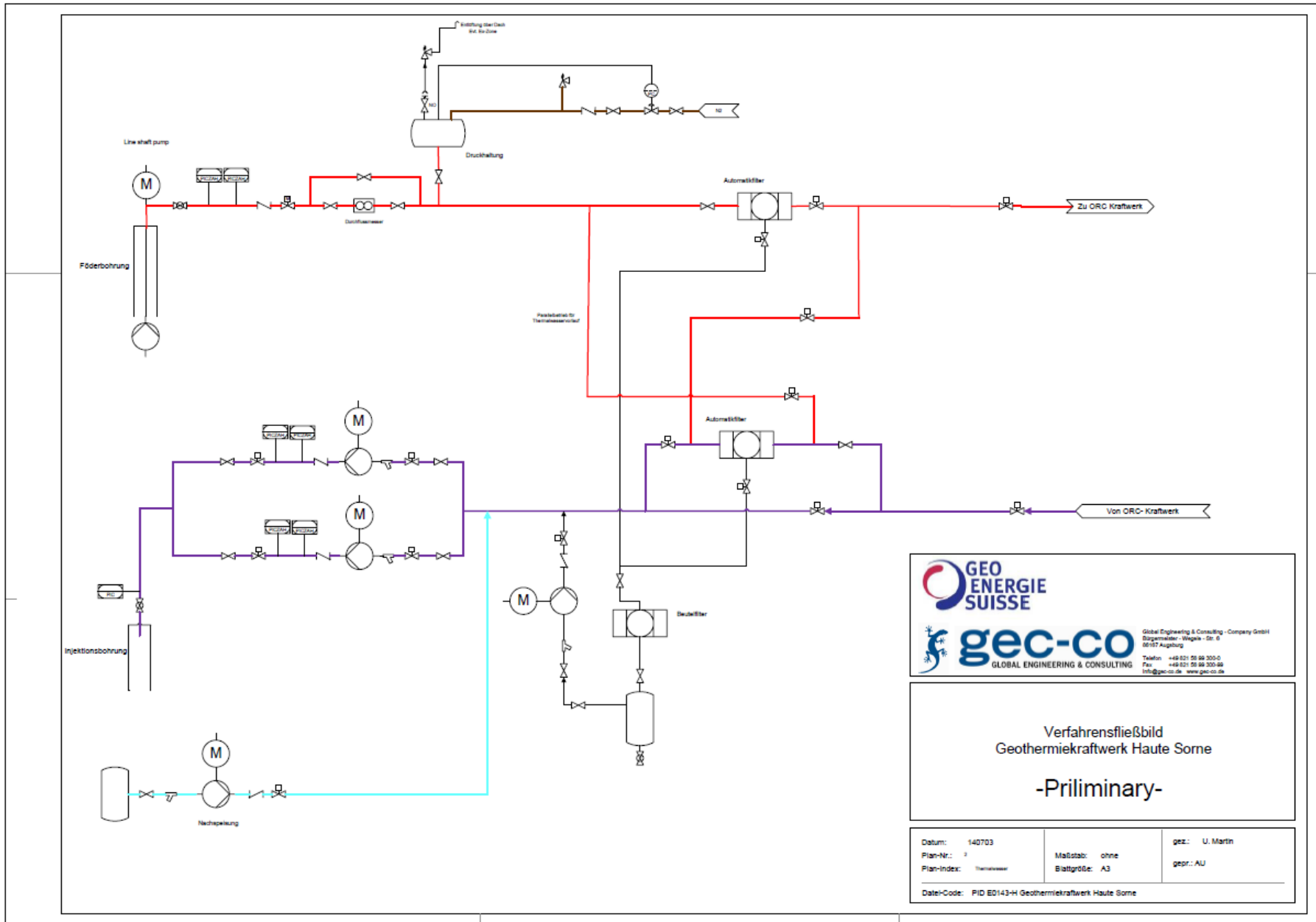
Annexe 4 : plan des canalisations



Annexe 5 : Schéma de l'installation ORC



2400.0001.fr/20.12.11



GEO ENERGIE SUISSE

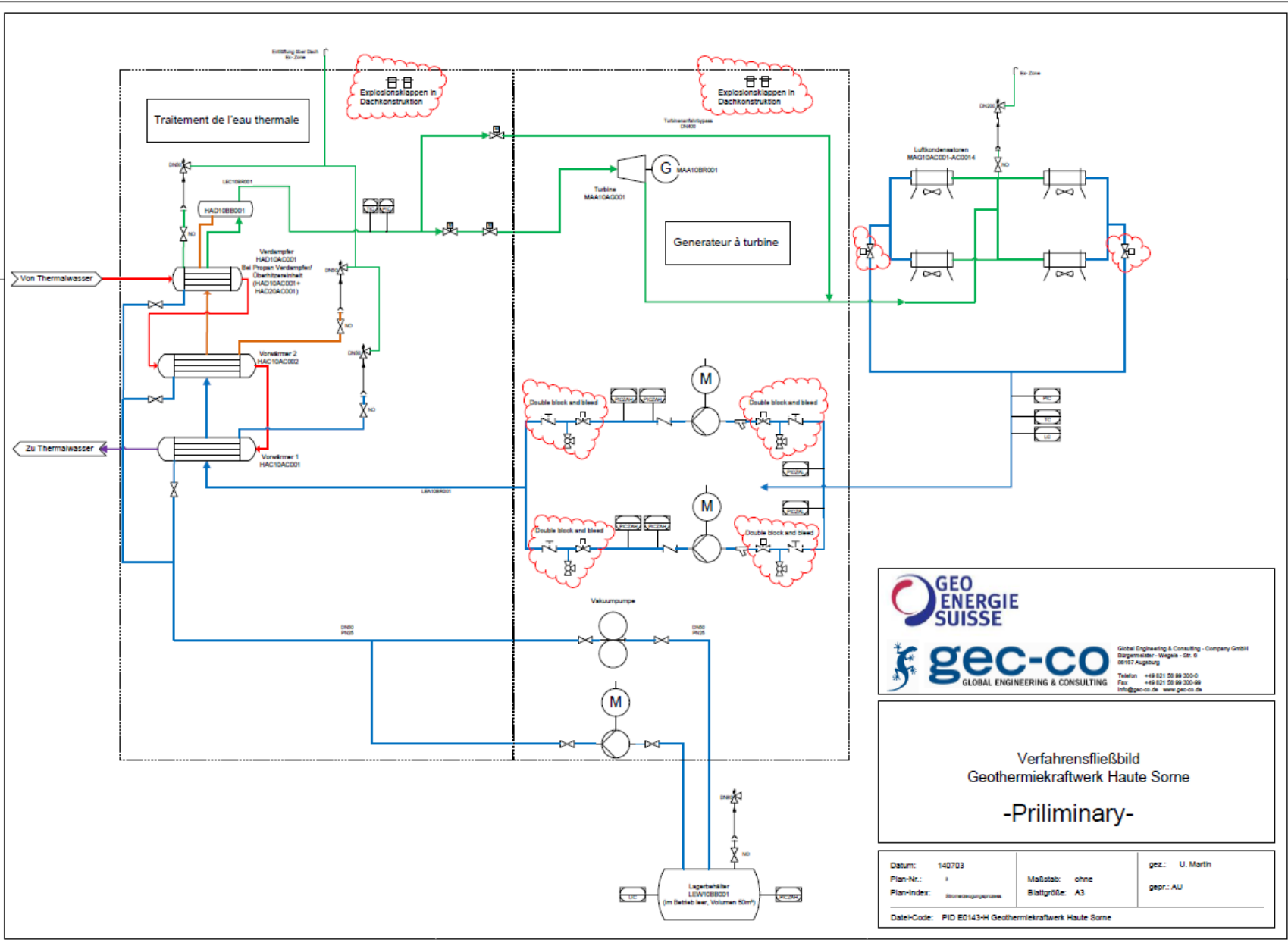
gec-co GLOBAL ENGINEERING & CONSULTING

Global Engineering & Consulting - Company GmbH
 Bürgermeister-Weg 4 - Str. 6
 89197 Augsburg
 Telefon: +49 (0) 89 99 300-0
 Fax: +49 (0) 89 99 300-99
 info@gec-co.de www.gec-co.de

Verfahrensfließbild
 Geothermiekraftwerk Haute Sorne

-Priliminary-

Datum: 140703	Maßstab: ohne	gez.: U. Martin
Plan-Nr.: 2	Blattgröße: A3	gepr.: AU
Plan-Index: Transmissor	Datei-Code: PID E0143-H Geothermiekraftwerk Haute Sorne	



GEO ENERGIE SUISSE
gec-co GLOBAL ENGINEERING & CONSULTING
 Global Engineering & Consulting - Company GmbH
 Dörmannstr. 106a - St. 6
 86167 Augsburg
 Telefon +49 021 26 96 300-0
 Fax +49 021 26 96 300-66
 info@gec-co.de www.gec-co.de

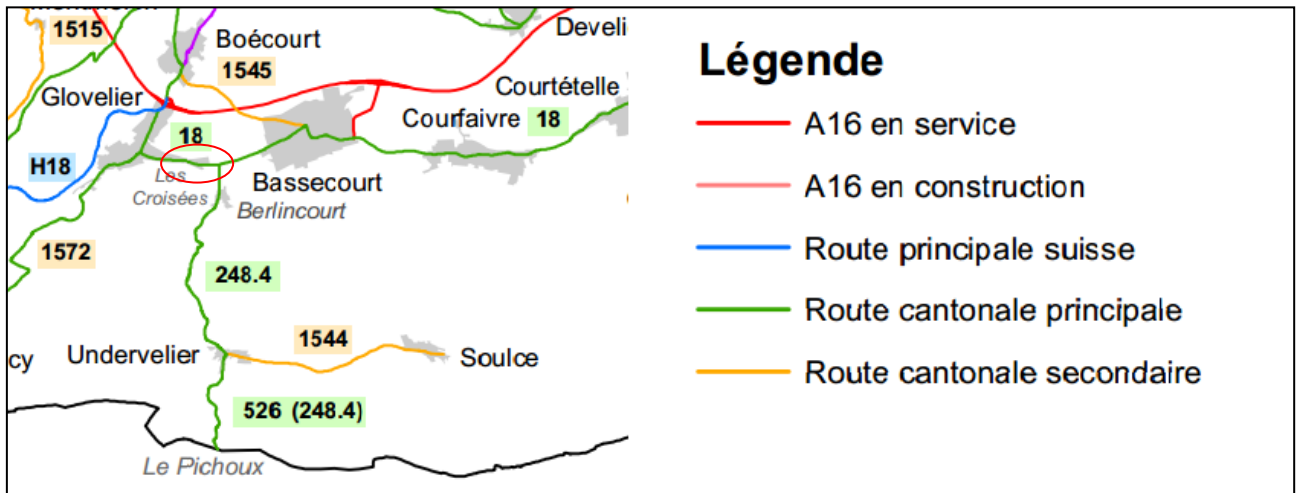
Verfahrensfließbild
 Geothermiekraftwerk Haute Some
-Priliminary-

Datum: 140703	Mastab: ohne	gez.: U. Martin
Plan-Nr.: 3	Blattgröße: A3	gepr.: AU
Datei-Code: PID E0143-H Geothermiekraftwerk Haute Some		

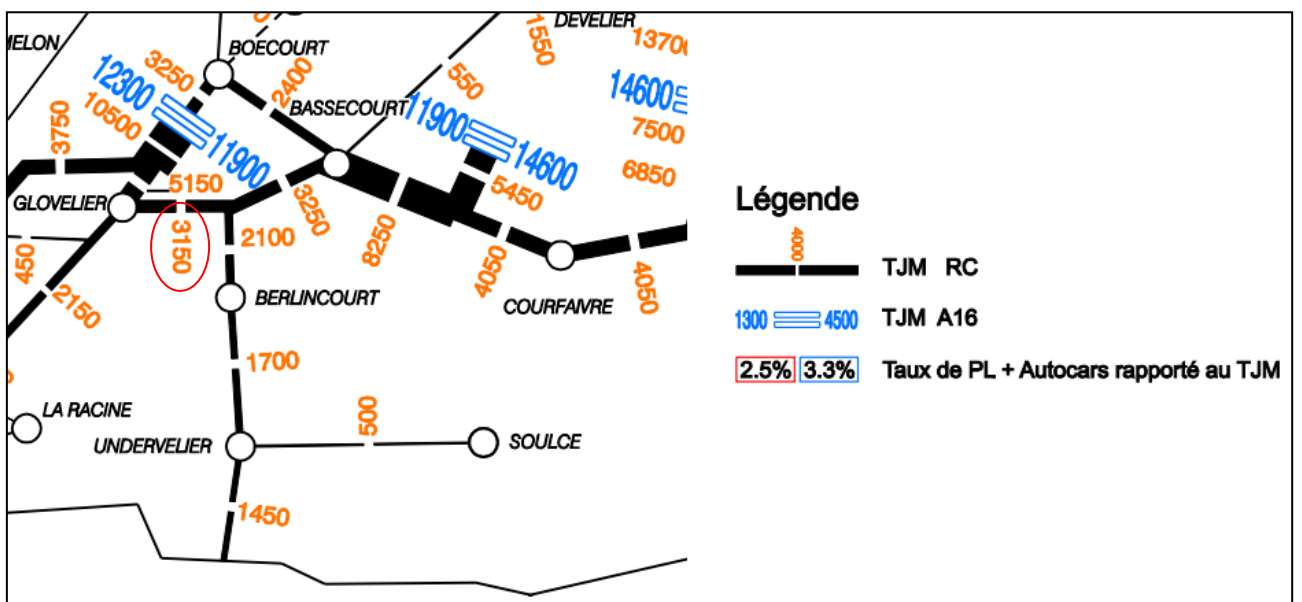
Annexe 6 : occupation rail et route

Présence sur la route

Configuration routière :



L'occupation des routes dans la zone incriminée est donnée par les comptages effectués par les autorités jurassiennes :



La zone concernée est donnée à un taux journalier moyen (TJM) de 3150 véhicules. Le taux moyen de véhicules lourds (camions + autocars) est de 2.5% (ratio camions cars 20 :1).

Taux journalier moyen développé :

Véhicule	TJM	Occupation	Vitesse moy.	Temps zone	Probabilité
Voiture	2819	1.5 p./vhc	13.5 m/s	15.1''	0.493
Camion	315	1.5 p./vhc	13.5 m/s	15.7''	0.057
Car	16	50 p./vhc	13.5 m/s	15.7''	0.003
Total	3150				

La longueur considérée pour la zone dangereuse est de 100 m depuis l'axe de l'épicentre. Les voitures sont considérées comme ponctuelles et les véhicules lourds à 12 m de longueur.

Présence sur le rail

Selon les documents de Stadler, des CFF et contact avec régulation des CFF, l'occupation du rail peut être considérée comme suit :

Horaire	Occupation moy.	Voyageurs	Nb. de trains	Temps	Probabilité
Lundi-vendredi	25 %	90	6x5	20.4''	
	50 %	180	62x5	20.4''	
	75 %	270	2x5	20.4''	
	100 %	360	2x5	20.4''	
Samedi	25 %	90	16	20.4''	
	50 %	180	52	20.4''	
	75 %	270	4	20.4''	
	100 %	360	0	20.4''	
Dimanche	25 %	90	4	20.4''	
	50 %	180	70	20.4''	
	75 %	270	0	20.4''	
	100 %	360	0	20.4''	
Semaine	25 %	90	50	1020''	1.69E-03
	50 %	180	432	8812.8''	1.46E-02
	75 %	270	14	285.6''	4.72E-04
	100 %	360	10	204''	3.37E-04

Vitesse moyenne constatée à 500 m de la gare (soit l'entrée de la zone) 50 km/h soit 13.9 m/s. La longueur moyenne d'un train type Flirt ou Domino est de 75 m.