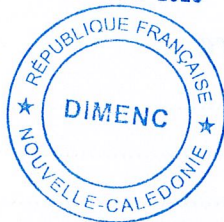


- 3 AVR. 2020



Référence : NDNC_R_MDR_1909_1c

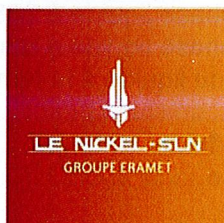
Date : Mars 2020

CE20-3160-Si-8M

Rapport

Etude des scénarios de Boil-Over sur le stockage de HFO de l'usine de Doniambo

SLN



Rédaction	Verification / Approbation
Sébastien HUGO 23/03/2020	Jonathan HERNANDO 02/04/2020

Sommaire

1	Avant-propos	4
1.1	Contexte	4
1.2	Préambule	4
1.3	Cadre et limite de l'étude	4
1.4	Auteurs de l'étude	4
1.5	Abréviations	5
2	Données des équipements et des produits	6
2.1	Caractéristiques des équipements	6
2.2	Caractéristiques du produit étudié	6
2.3	Installations et éléments vulnérables à proximité	7
3	Modélisation des boil-over	8
3.1	Le phénomène	8
3.2	Modèle utilisé	9
3.2.1	Méthode utilisée en 2013	9
3.2.2	Méthode proposée	9
3.3	Etude de sensibilité des caractéristiques de HFO	10
3.3.1	Température ébullition de l'hydrocarbure	11
3.3.2	Chaleur de combustion de l'hydrocarbure	12
3.3.3	Masse spécifique de la phase liquide à 288 K	13
3.3.4	Masse spécifique de la phase liquide à température ambiante	14
3.3.5	Chaleur de vaporisation du liquide à la température d'ébullition	14
3.3.6	Plage de distillation	14
3.3.7	Température critique du fluide	16
3.3.8	Pression critique du fluide	16
3.4	Seuils retenus	16
4	Evaluation des zones de danger	17
4.1	Modélisation	17
4.2	Représentation graphique	17
5	Estimation de la criticité	19
5.1	Estimation de la gravité	19
5.2	Estimation de la probabilité	24
5.3	Détermination de la criticité	25
5.4	Cinétique	25
6	Mesures de maîtrise des risques	26
7	Conclusion	27

Liste des figures

Figure 1 : Localisation du scénario et des équipements	6
Figure 2 : Evolution des distances d'effets selon la température d'ébullition	12
Figure 3 : Evolution des distances d'effets selon la chaleur de combustion	13
Figure 4 : Evolution des distances d'effets selon la chaleur de vaporisation	14
Figure 5 : Evolution des distances d'effets selon la plage de distillation	15
Figure 6 : Evolution des distances d'effets selon la chaleur de vaporisation	16
Figure 7 : Cartographie des effets d'un boil-over sur le réservoir TO1	18
Figure 8 : Cartographie des effets d'un boil-over sur le réservoir TO3	18
Figure 9 : Cartographie des effets d'un boil-over sur le réservoir TO4	19
Figure 10 : Cartographie de l'occupation des sols (source : EDD 2013)	21
Figure 11 : Nœud-papillon du boil-over (source : guide bleu de l'UFIP)	24
Figure 12 : Echelle de probabilité de l'arrêt du 29/09/2005	25
Figure 13 : Matrice de criticité des scénarios de boil-over	25

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristique des équipements	6
Tableau 2 : Caractéristiques du HFO étudié	7
Tableau 3 : Définition des éléments vulnérables interne (source EDD 2013)	7
Tableau 4 : Localisation des éléments vulnérables (source EDD 2013)	8
Tableau 5 : Valeurs de température d'ébullition (source analyse annexe 1)	11
Tableau 6 : Valeurs de masse spécifique (source analyse annexe 1)	13
Tableau 7 : Valeurs des températures de distillation initiale et finale (source analyse annexe 1)	14
Tableau 8 : Valeurs seuils réglementaires pour les effets sur les humains	17
Tableau 9 : Distances d'effets aux valeurs seuils retenues	17
Tableau 10 : Evaluation de la gravité du scénario de boil-over sur le réservoir TO1	22
Tableau 11 : Evaluation de la gravité du scénario de boil-over sur le réservoir TO3	22
Tableau 12 : Evaluation de la gravité du scénario de boil-over sur le réservoir TO4	23

1 AVANT-PROPOS

1.1 Contexte

Ce document s'inscrit dans le cadre d'une demande de la société SLN afin de préciser les résultats de modélisation des effets d'un Boil-Over sur ses installations de stockage de HFO.

Les conclusions de l'ancienne étude de ces scénarios ont mené à une limitation des quantités de HFO stockées dans chacun des réservoirs. La méthode de calcul choisie lors de la précédente étude est très dimensionnante de part le choix de valeurs génériques. La méthode proposée dans la présente étude reprend les mêmes modèles de calcul, avec cette fois-ci les caractéristiques du fioul de la SLN.

1.2 Préambule

Cette fiche se compose de la manière suivante :

- ✓ Description du contexte,
- ✓ Données de l'équipement : les caractéristiques de l'équipement étudié ainsi que la composition et les propriétés du fluide véhiculé dans cet équipement sont détaillés,
- ✓ Description des scénarios : le déroulement des scénarios est expliqué ainsi que les différents phénomènes à quantifier,
- ✓ Choix du scénario retenu avec les hypothèses de calcul et les modèles utilisés,
- ✓ Modélisation des scénarios en ne prenant en compte que les barrières de sécurité passives,
- ✓ Calcul des zones de dangers,
- ✓ Cartographie des zones de dangers,
- ✓ Détermination du niveau de probabilité,
- ✓ Détermination du niveau de gravité,
- ✓ Détermination du niveau de risque et conclusion,

1.3 Cadre et limite de l'étude

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à Néodyme NC, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de Néodyme NC ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

Néodyme NC dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

1.4 Auteurs de l'étude

La présente étude a été réalisée par la société Néodyme Nouvelle Calédonie, située 15 route du Sud, Immeuble Cap Normandie, 98800 Nouméa.

1.5 Abréviations

BTS : Basse Teneur en Soufre

EDD : Etude de Dangers

FDS : Fiches de Données de Sécurité

HFO : Heavy Fuel Oil

SEI : Seuil des Effets Irréversibles

SEL : Seuil des premiers Effets Létaux

SELS : Seuil des Effets Létaux Significatifs

TBTS : Très Basse Teneur en Soufre

TDI : Température de Distillation Initiale

TDF : Température de Distillation Finale

UFIP : Union Française des Industries Pétrolière

2 DONNEES DES EQUIPEMENTS ET DES PRODUITS

2.1 Caractéristiques des équipements

La SLN stocke deux types de fioul (basse teneur en soufre – BTS et très basse teneur en soufre – TBTS) dans les réservoirs TO1, TO3 et TO4 situés dans les cuvettes A et B. Ces réservoirs sont approvisionnés par des pétroliers toutes les 4 à 6 semaines. Les quantités livrées par bateau sont de l'ordre de 50 à 55 000 litres de fioul lourd.

Ces réservoirs sont localisés sur la cartographie ci-dessous :



Figure 1 : Localisation du scénario et des équipements

Les caractéristiques des réservoirs, corrigées de la précédente étude, sont les suivantes :

Réservoir	TO1	TO3	TO4
Diamètre du réservoir	54,9 m	54,9 m	63 m
Hauteur robe	12,22 m	12,06 m	19,3 m
Hauteur toit	5,5 m	5,5 m	5,25 m
Hauteur totale	17,72 m	17,56 m	24,55
Surface	2 376 m ²	2 376 m ²	3 117 m ²
Capacité	28 000 m ³	28 000 m ³	60 000 m ³

Tableau 1 : Caractéristique des équipements

Ces réservoirs sont équipés :

- ✓ D'un indicateur de niveau local avec alarme haute (90%) et très haute (95%) au dispatching (NRJ) ;
- ✓ D'un thermomètre local avec en plus sur les TO3 et TO4 des sondes de températures au pas de 5 m de hauteur ;
- ✓ De tubulures d'évent.

2.2 Caractéristiques du produit étudié

Le produit considéré est le HFO. Ses principales caractéristiques, exploitables dans l'analyse de ce scénario, sont indiquées ci-après.

HFO	Température ébullition de l'hydrocarbure*	823,5 K
	Chaleur de combustion de l'hydrocarbure*	43,649 MJ/kg
	Masse spécifique de la phase liquide à 288 K*	1020 kg/m ³
	Masse spécifique de la phase liquide***	1013,2 kg/m ³
	Chaleur de vaporisation du liquide à la température d'ébullition**	104,7 kJ/kg
	Température initiale de distillation (15%)*	608,7 K
	Température de distillation finale (85%)*	892,5 K
	Température critique du fluide***	991 K
	Pression critique du fluide**	8,6 MPa

Tableau 2 : Caractéristiques du HFO étudié

Sources :

* : Données HFO SLN (FDS ou documentation technique),

** : Données génériques de l'UFIP,

*** : Calculée à partir de la masse spécifique à 288 K.

Les données du HFO ont été définies suite à une étude sur 5 échantillons de HFO provenant de différentes livraisons (annexe 1).

Une étude de sensibilité a été effectuée afin de déterminer les valeurs conservatives pour chacune des caractéristiques. Cette étude est présentée dans le paragraphe 0 de la présente étude.

2.3 Installations et éléments vulnérables à proximité

Les installations dans le voisinage à une centaine de mètres se répartissent comme suit :

Installation	Direction	Vulnérable	Potentiel dangers
EMC	N	Entreprise voisine	Faible : incendie
Convoyeur T301	SE	Oui pour le transfert du minerai pour le déchargement de minéraliers	Non
Pomperie fioul GG et JF	E	Oui : alimente l'usine, les bateaux et la centrale Enercal	Oui : feu de nappe
Chemin de câble	N	Oui : alimente le local pomperie du réseau incendie	Non
Poste électrique P12/1 et P12/2	NE	Oui : alimente le local pomperie du réseau incendie	Oui risque incendie et explosion
Stockage huiles usagées	N	Non	Oui : Incendie
Dock FGE	S	Oui : Maintenance des convoyeurs	Oui : Incendie
Pomperie incendie	W	Oui : assure la défense contre l'incendie	Non
Skid 1 et 2	W	Oui : assure la défense contre l'incendie	Non

Tableau 3 : Définition des éléments vulnérables interne (source EDD 2013)

Les centres des réservoirs sont à une distance telle que définie dans le tableau ci-après des cibles extérieures à la SLN

Distance des centres des réservoirs	TO1	TO3	TO4
Premières habitations (cité Doniambo)	675 m	780 m	875 m
Centrale Enercal	700 m	775 m	775 m
Port autonome	1 050 m	1 120 m	1 150 m
Voie de dégagement ouest (VDO)	1 020 m	1 150 m	1 235 m
SSP Dépôt pétrolier de Ducos	1 280 m	1 300 m	1 300 m
Zone d'habitation Papeete	1 150 m	1 150 m	1 100 m
Zone commerciale Plexus	1 650 m	1 650 m	1 680 m

Tableau 4 : Localisation des éléments vulnérables (source EDD 2013)

3 MODELISATION DES BOIL-OVER

3.1 Le phénomène

Un boil-over est un phénomène de moussage brutal impliquant des réservoirs atmosphériques et résultant de la transformation d'eau liquide contenue dans un réservoir en feu en vapeur (fond d'eau, eau libre, émulsion).



En début d'incendie du bac, le produit occupe tout le volume du bac avec une composition quasi- homogène. En raison du rayonnement des flammes sur la surface du liquide, le liquide subit une onde de chaleur



Ce phénomène perdure jusqu'à ce que les coupes les plus lourdes (onde de chaleur) atteignent l'eau située au fond du bac. Cette onde de chaleur a une température de l'ordre de 200 °C (Valeur prise par défaut dans le modèle INERIS).



Le contact entre l'onde de chaleur et l'eau provoque la vaporisation de cette dernière. Cette vaporisation brutale conduit à une augmentation importante de volume et joue le rôle de piston en mettant en suspension le liquide inflammable restant dans le bac.



Une partie du liquide déborde du bac et une autre est mise en suspension en se fragmentant en gouttes et en se vaporisant en traversant les flammes pour former une boule de feu lors de sa combustion

Pour qu'un boil-over se produise, 4 conditions doivent donc être réunies :

- ✎ le feu du bac ;
- ✎ la présence d'eau à transformer en vapeur. Cette condition est presque toujours remplie car :
 - le fioul à une certaine teneur en eau : une vidange est faite de manière hebdomadaire ;
 - en cas de feu, il y aura les eaux d'extinction ;
- ✎ la création d'une onde de chaleur qui entre en contact avec le fond d'eau situé sous la masse d'hydrocarbures ;
- ✎ un hydrocarbure suffisamment visqueux pour que la vapeur ne puisse pas traverser facilement depuis le bas.

3.2 Modèle utilisé

La méthode de calcul mise en place dans cette étude diffère de celle présentée dans l'étude de dangers du site de Doniambo réalisée en 2013.

3.2.1 Méthode utilisée en 2013

Lors de la réalisation de l'étude de dangers de 2013, la modélisation des effets avait été réalisée via la méthode présentée dans le rapport Omega 13 de l'INERIS. Cette méthode se base sur les formules de calcul de l'UFIP présentées dans son guide bleu.

Dans sa méthode de calcul, l'INERIS simplifie le modèle développé par l'UFIP en fixant des valeurs de certains produits telles que la plage de distillation, la chaleur de combustion, etc.

Dans une démarche conservatrice l'INERIS a donc intégré des valeurs majorantes par catégorie de fluide. Ainsi, les résultats des modélisations sont majorés.

3.2.2 Méthode proposée

Dans l'optique d'affiner les résultats de ces modélisations, la SLN a souhaité mettre en place une méthode adaptée aux caractéristiques du fioul stocké dans les réservoirs de Doniambo. Ainsi, il a été proposé d'utiliser le modèle de calcul de l'UFIP en prenant en compte les caractéristiques spécifiques réelles des fiouls utilisés.

La méthode proposée par l'UFIP est une modélisation des effets de la boule de feu formée d'un boil-over selon les principales étapes suivantes :

- ✎ Détermination de la quantité d'hydrocarbure participant à la formation de la boule de feu,
- ✎ Estimation des caractéristiques de la boule de feu,
- ✎ Caractérisation des effets du rayonnement de la boule de feu sur une personne exposée.

3.2.2.1 Détermination de la quantité d'hydrocarbure

Le phénomène de boil-over est une conséquence d'un feu de bac. Une condition nécessaire est donc que la vitesse de descente de l'onde de chaleur excède la vitesse de combustion de l'hydrocarbure contenu dans le bac, sans quoi il n'y aurait plus d'hydrocarbure pour participer à un quelconque effet conséquence.

La démarche adoptée consiste à considérer la courbe de distillation de l'hydrocarbure impliquée et à remarquer que ne participeront à la boule de feu que les fractions dont la température d'ébullition est égale ou supérieure à la température de l'onde de chaleur.

Pour calculer la température de l'onde de chaleur, il est donc nécessaire d'estimer le temps de parcours de cette dernière pour atteindre le fond du bac. Ce temps correspond alors au temps de déclenchement du phénomène.

Pendant ce temps, nécessaire à l'onde de chaleur pour atteindre le fond du bac, une épaisseur d'hydrocarbures aura été brûlée.

L'effet de boule de feu est un phénomène très complexe et peu aisé à quantifier.

Le premier problème à résoudre est l'estimation de la masse de vapeur d'hydrocarbure participant à ce phénomène de boule de feu. Pour ce faire trois phénomènes doivent être considérés :

- ✓ L'accroissement fictif de température de l'hydrocarbure liquide dû à l'effet piston et à la dépressurisation,
- ✓ L'accroissement de température dû à l'échange thermique par radiation et convection entre l'hydrocarbure liquide expulsé et le cylindre de flammes de la surface du bac en feu,
- ✓ La fraction liquide vaporisant.

3.2.2.2 Caractéristiques de la boule de feu

La masse vapeur relâchée forme un nuage dont la concentration excède la limite supérieure d'inflammabilité. Il s'agit d'une masse gazeuse trop riche qui ne peut donner lieu qu'à un phénomène de combustion laminaire appelé "boule de feu".

La radiance PHIO de la boule de feu et prise égale à 150 000W/m².

Sont ensuite déterminées les caractéristiques suivantes :

- ✓ Rayon de la boule de feu
- ✓ Durée de vie de la boule de feu
- ✓ Hauteur de la boule de feu

3.2.2.3 Calcul des effets conséquences de la boule de feu

Le calcul des effets est réalisé en considérant l'intensité des radiations ainsi que de la durée d'exposition à ces radiations.

L'équation utilisée pour le calcul du flux thermique est celle proposée par l'INERIS dans la définition des seuils des effets thermiques.

Afin de déterminer les effets sur une cible, le facteur de vue est calculé pour les cibles à hauteur d'homme, prenant en compte :

- ✓ La distance avec la boule de feu,
- ✓ Le rayon de la boule de feu,
- ✓ La hauteur de la boule de feu.

3.2.3 Etude de sensibilité des caractéristiques de HFO

Afin de mettre en place le modèle de calcul de l'UFIP, plusieurs analyses ont été effectuées sur des échantillons de HFO livrés à la SLN. Les échantillons 1, 3 et 5 ont été prélevés sur du fioul TBTS et les échantillons 2 et 4 sur du fioul BTS.

Afin de déterminer les caractéristiques majorantes une étude de sensibilité a été réalisée pour certains paramètres présentés dans les paragraphes suivants.

Deux paramètres n'ont pas fait m'objet d'étude de sensibilité, la LSE et la densité de la phase gazeuse. En effet, pour ce qui concerne la LES, toutes les données issues de la littérature (différentes FDS consultées) indiquent systématiquement une LSE d'environ 5,5%.

Quant à la densité en phase gazeuse, la valeur présentée par l'UFIP de 23,143 kg/m³ a été retenue pour cette étude. Les fournisseurs de fioul de la SLN n'ont pu fournir d'autres valeurs ou protocole d'analyse pour ce paramètre, et peu d'information sont disponibles dans la littérature quant à ce dernier. En outre, il faudrait des variations de composition (et donc de masse molaire) suffisamment importante du fioul pour que ce paramètre varie significativement. Enfin, en faisant varier ce paramètre de manière arbitraire, on constate que l'augmentation de cette valeur induit une diminution des distances d'effet, or, il apparaît peu probable que cette valeur aille dans le sens d'une réduction puisque cela supposerait une présence de coupe légère plus importante dans le fioul, ce qui ne va pas dans la logique de raffinage et valorisation des produits pétroliers. Le parti a donc été pris pour cette étude de conserver la valeur issue de l'UFIP.

3.2.4 Température ébullition de l'hydrocarbure

La température d'ébullition moyenne de l'hydrocarbure est un paramètre important. Le tableau ci-dessous présente les valeurs de température d'ébullition pour les échantillons étudiés :

Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3	Echantillon 4	Echantillon 5
792 K	780,2 K	762,6 K	796,1 K	728,7 K

Tableau 5 : Valeurs de température d'ébullition (source analyse annexe 1)

La température d'ébullition moyenne de l'hydrocarbure doit être supérieure à celle de l'eau à la pression d'interface fond d'eau/hydrocarbure. En effet, dans la mesure où le principe général du phénomène de boil-over est la vaporisation d'un fond d'eau susceptible d'éjecter une partie de la masse d'hydrocarbure située au-dessus de lui, on conçoit que pour vaporiser le fond d'eau, il doit être mis en contact avec un produit dont la température est supérieure ou égale à la température d'ébullition de l'eau.

Sur le graphique ci-dessous on peut observer la variation des résultats par rapport à la valeur de référence, à savoir celle du premier échantillon.

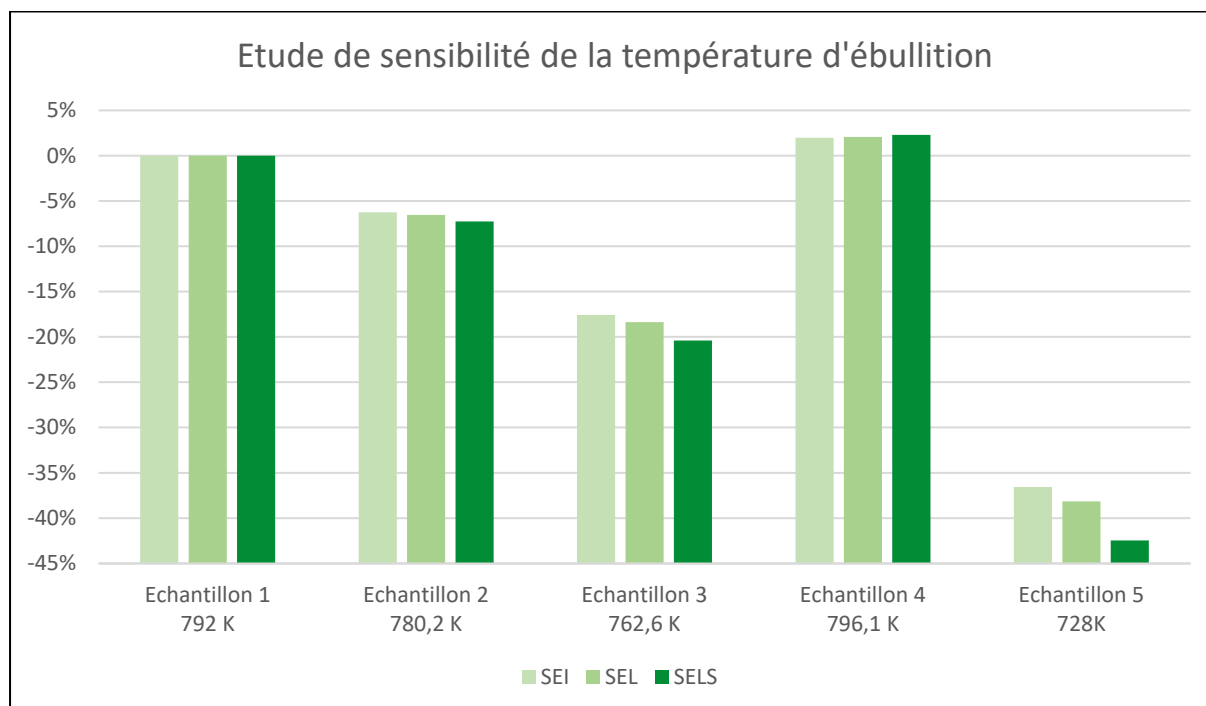


Figure 2 : Evolution des distances d'effets selon la température d'ébullition

Le graphique ci-dessous permet de vérifier l'hypothèse que plus la température d'ébullition est élevée plus les distances d'effets sont importantes.

La valeur moyenne de ce paramètre sur les échantillons étudiés est de 771,9 K et l'écart-type est de 27,4 K. Ainsi, il est proposé, de manière conservative, de considérer la température maximale mesurée augmentée de l'écart-type.

Dans ce cadre, la valeur considérée dans l'étude sera donc de 796,1 K + 27,4 K, soit une température de 823,5 K.

3.2.5 Chaleur de combustion de l'hydrocarbure

La chaleur de combustion du HFO a été calculée pour les 5 échantillons. Le tableau ci-dessous présente les valeurs de chaleur de combustion pour les échantillons étudiés :

Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3	Echantillon 4	Echantillon 5
42,501 MJ/kg	42,400 MJ/kg	42,885 MJ/kg	42,700 MJ/kg	43,295 MJ/kg

Tableau 6 : Valeurs de chaleur de combustion (source analyse annexe 1)

Sur le graphique ci-dessous on peut observer la variation des résultats par rapport à la valeur de référence, à savoir celle du premier échantillon.

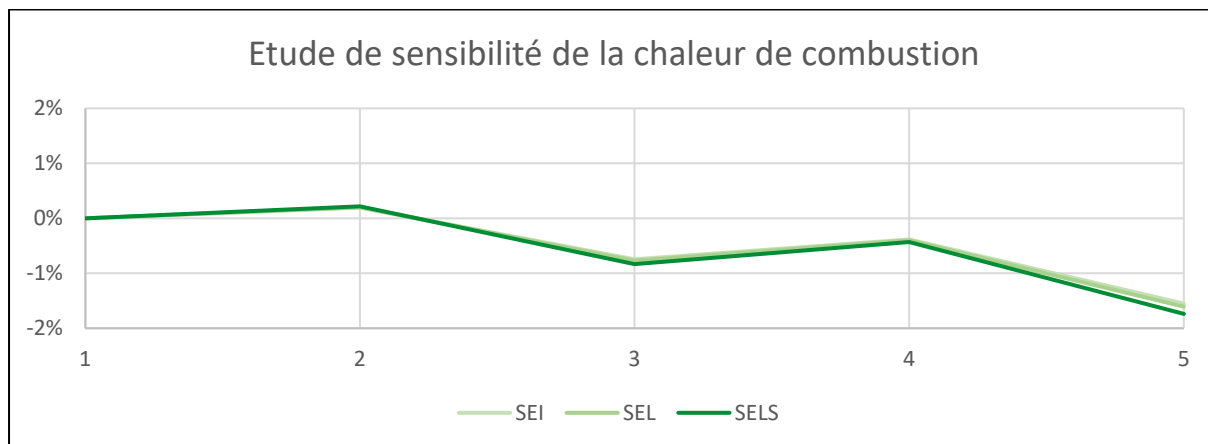


Figure 3 : Evolution des distances d'effets selon la chaleur de combustion

Le graphique ci-dessous permet de vérifier l'hypothèse que plus la chaleur de combustion est faible plus les distances d'effets sont importantes.

Il a été calculé la variation des résultats par rapport à la valeur de référence, à savoir celle du premier échantillon. Les résultats indiquent une diminution de 2% des distances d'effets pour l'échantillon 5 comparé à l'échantillon 1.

Le graphique ci-dessous permet de vérifier l'hypothèse que plus la chaleur de combustion est faible plus les distances d'effets sont importantes.

Ainsi, il est proposé, de manière conservatrice, de considérer la chaleur de combustion minimale mesurée diminuée de l'écart-type.

La valeur considérée dans l'étude sera donc de 42,400 MJ/kg - 0,354 MJ/kg, soit une chaleur de combustion de 42,046 MJ/kg.

3.2.6 Masse spécifique de la phase liquide à 288 K

La masse spécifique d'une substance est le rapport de sa masse par son volume.

La masse spécifique de la phase liquide joue un rôle non négligeable. Le tableau ci-dessous présente les valeurs de masse spécifique pour les échantillons étudiés :

Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3	Echantillon 4	Echantillon 5
935,3 kg/m ³	989,3 kg/m ³	989,3 kg/m ³	NC	NC

NC : Non calculé

Tableau 7 : Valeurs de masse spécifique (source analyse annexe 1)

Il a été calculé la variation des résultats par rapport à la valeur de référence, à savoir celle du premier échantillon. Les résultats indiquent une augmentation de 4% des distances d'effets pour les échantillons 2 et 3 comparé à l'échantillon 1.

Ainsi plus la masse spécifique est élevée plus les distances d'effets sont importantes.

Ainsi, il est proposé, de manière conservatrice, de considérer la masse spécifique maximale mesurée augmentée de l'écart-type.

La valeur considérée dans l'étude sera donc de $989,3 \text{ kg/m}^3 + 31,2 \text{ kg/m}^3$, soit une masse spécifique de $1020,5 \text{ kg/m}^3$.

3.2.7 Masse spécifique de la phase liquide à température ambiante

Cette valeur est obtenue par calcul à partir de la masse spécifique à 288 K. Ainsi, les résultats de l'étude de sensibilité de ce paramètre sont intégrés à l'étude de sensibilité du point précédent.

3.2.8 Chaleur de vaporisation du liquide à la température d'ébullition

La chaleur latente de vaporisation désigne la quantité de chaleur nécessaire pour faire passer un gramme de substance de l'état liquide à l'état gazeux, à température constante.

La valeur de la chaleur de vaporisation du liquide a été reprise des données génériques de l'UFIP pour le HFO à savoir 105 kJ/kg . Afin d'étudier la sensibilité de ce paramètre nous l'avons fait varier de plus ou moins 10 %.

Sur le graphique ci-dessous on peut observer la variation des résultats par rapport à la valeur de référence, à savoir celle donnée par l'UFIP.

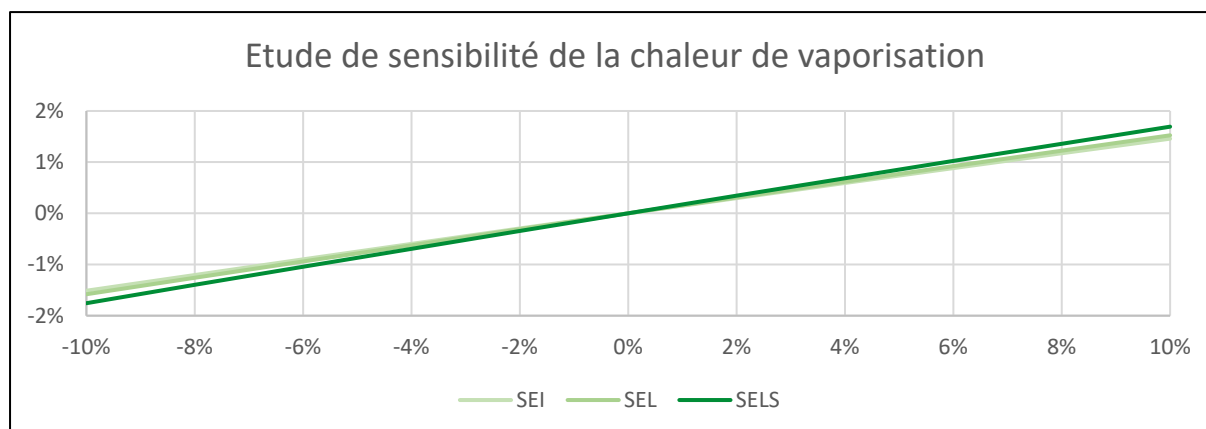


Figure 4 : Evolution des distances d'effets selon la chaleur de vaporisation

Le graphique ci-dessous permet de mettre en évidence que la chaleur de vaporisation influe que très peu sur les distances d'effets.

La valeur considérée dans l'étude sera donc la valeur générique de l'UFIP. Pour rappel, ces valeurs sont déjà conservatives.

3.2.9 Plage de distillation

La plage de distillation est définie par la température initiale de distillation (15%) (TDI) et la température de distillation finale (85%) (TDF). Le tableau ci-dessous présente les valeurs de ces températures pour les échantillons étudiés :

	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3	Echantillon 4	Echantillon 5
TDI	550 K	576,8 K	575,7 K	565,7 K	592,9 K
TDF	965,5 K	989,4 K	955 K	986,9 K	920,5 K

Tableau 8 : Valeurs des températures de distillation initiale et finale (source analyse annexe 1)

Dans le cas de combustion d'un hydrocarbure caractérisé par une large plage de températures d'ébullition, les coupes légères à bas point d'ébullition montent à la surface et alimentent le feu, tandis que les coupes plus lourdes à haut point d'ébullition, coulent vers le fond et forment un front chaud qui réchauffe les couches d'hydrocarbures froids de plus en plus profondes, tandis que le feu continue de brûler en surface.

En cas de combustion d'un hydrocarbure caractérisé par une plage étroite de températures d'ébullition, la chaleur ne pénètre qu'une couche peu profonde d'hydrocarbures sous la surface en feu.

Pour qu'il y ait formation d'une onde de chaleur, il faut donc que la plage d'ébullition soit suffisante, c'est-à-dire qu'elle corresponde à une coupe suffisamment composée de corps purs différents. Le guide de l'UFIP précise que la plage minimum pour la formation d'une onde de chaleur est de 60°C.

Cependant, plus la plage de distillation est élevée, plus la combustion sera longue par couche et donc plus il y aura de produit consommé par l'incendie lors de l'apparition du boil-over. Ainsi, **plus la plage de distillation est faible plus les effets seront importants (volume de produit participant à la boule de feu plus important) tant que la condition de 60°C est satisfaite.**

Sur le graphique ci-dessous on peut observer la variation des résultats par rapport à la valeur de référence, à savoir celle du premier échantillon.

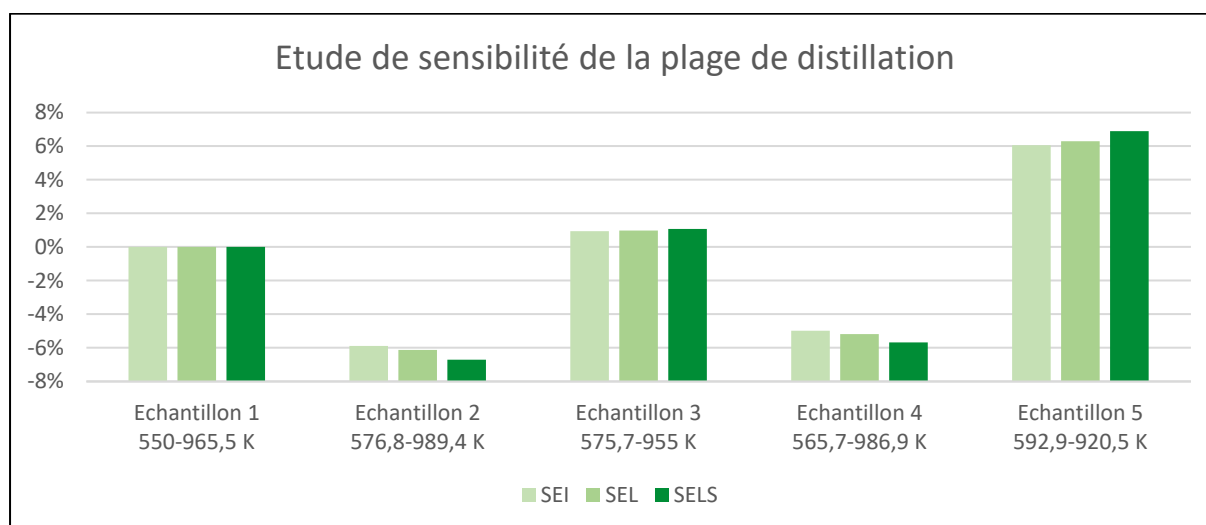


Figure 5 : Evolution des distances d'effets selon la plage de distillation

Le graphique ci-dessous permet de vérifier l'hypothèse que plus la plage de distillation est étroite plus les distances d'effets sont importantes.

Les valeurs dimensionnantes de ce paramètre sur les échantillons étudiés sont celles de l'échantillon 5 qui dispose de la TDI la plus élevée et la TDF la plus faible. L'écart-type sur ces valeurs est de respectivement 15,8 K et 28 K. Ainsi, il est proposé, de manière conservatrice, de considérer la plage minimale mesurée réduite de ces deux écart-types.

Les valeurs considérées dans l'étude seront donc de 592,9 K + 15,8 K, soit une température initiale de distillation de 608,7 K et de 920,5 K - 28 K, soit une température de distillation finale de 892,5 K.

3.2.10 Température critique du fluide

La température critique d'une substance est la température du point critique. Le point critique étant la limite pour laquelle le volume d'un liquide est égal à celui d'une masse égale de vapeur.

La température critique peut être déterminée grâce à la formule de Lee & Kesler permettant d'obtenir la température critique en fonction de la masse spécifique d'un hydrocarbure. Ainsi, les résultats de l'étude de sensibilité de ce paramètre sont intégrés à l'étude de sensibilité de la masse spécifique.

3.2.11 Pression critique du fluide

La pression critique d'un fluide est la pression au point critique.

La valeur de la pression critique du liquide a été reprise des données génériques de l'UFIP pour le HFO à savoir 8,6 MPa.

La pression critique intervient uniquement dans le calcul de l'accroissement fictif de la température (négligeable dans le cas du fioul car la température de l'onde de chaleur est très importante). Ainsi, dans le cas du fioul ce paramètre ne devrait que très peu influencer sur les résultats.

Afin d'étudier la sensibilité de ce paramètre, nous l'avons fait varier avec un facteur allant de 0,001 à 1000.

Sur le graphique ci-dessous on peut observer la variation des résultats par rapport à la valeur de référence, à savoir celle donnée par l'UFIP.

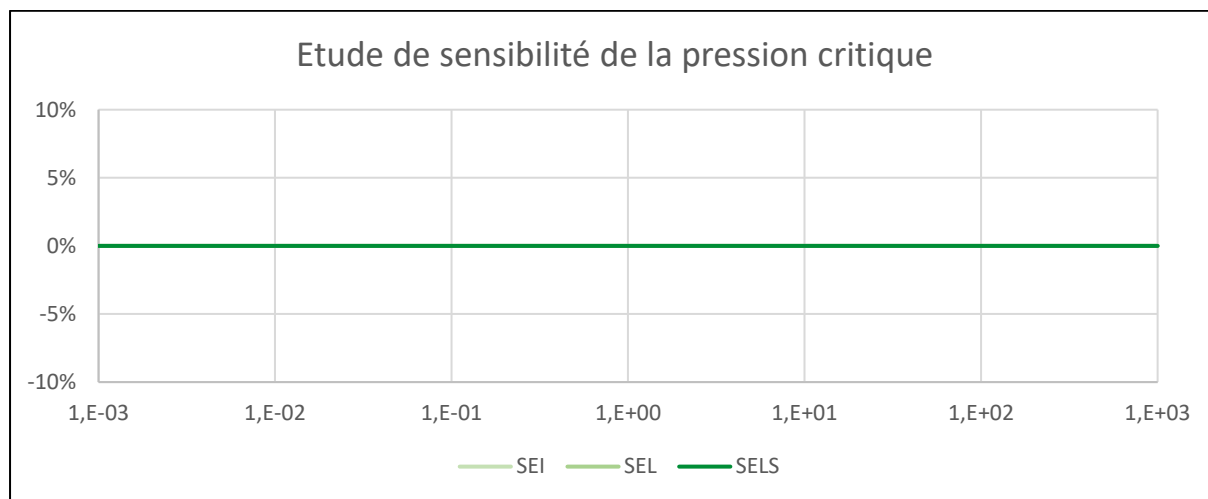


Figure 6 : Evolution des distances d'effets selon la chaleur de vaporisation

Le graphique ci-dessous permet de mettre en évidence que la pression critique du fluide n'influe pas du tout sur les résultats.

La valeur considérée dans l'étude sera donc la valeur générique de l'UFIP.

3.3 Seuils retenus

La réglementation métropolitaine, via l'arrêté du 29 septembre 2005, a fixé des seuils d'effets permettant d'apprécier la gravité d'un phénomène dangereux sur l'Homme et sur les structures

par rapport aux effets thermiques. Les effets thermiques d'un boil-over sont brefs mais intenses, c'est pourquoi les valeurs réglementaires à prendre en compte sont des doses thermiques et non pas des flux thermiques.

Seuils d'effets thermiques	Effets sur les hommes	
600 (kW/m ²) ^{4/3}	Seuil des effets irréversibles	SEI
1000 (kW/m ²) ^{4/3}	Seuil des effets létaux	SEL
1800 (kW/m ²) ^{4/3}	Seuil des effets létaux significatifs	SELS

Tableau 9 : Valeurs seuils réglementaires pour les effets sur les humains

4 EVALUATION DES ZONES DE DANGER

4.1 Modélisation

Les modélisations des Boil-overs sur les 4 réservoirs donnent les résultats suivants (arrondis à la dizaine) :

Boilover (distance en m depuis le centre du bac)	SELS	SEL	SEI	Délai de survenu
TO1	432 m	595 m	755 m	50 h
TO3	430 m	592 m	750 m	49 h
TO4	623 m	840 m	1 056 m	79 h

Tableau 10 : Distances d'effets aux valeurs seuils retenues

4.2 Comparaison des résultats à la précédente étude

Le tableau ci-dessous compare les résultats pour les différents réservoirs.

Réservoir	Hypothèse	SEI	SEL	SELS
TO1	INERIS – 100 % de remplissage (EDD 2013)	1050 m	850 m	690 m
	INERIS – 86% de remplissage	980 m	800 m	690 m
	UFIP – 100% de remplissage (2019)	755 m	595 m	432 m
TO3	INERIS – 100 % de remplissage (EDD 2013)	1110 m	900 m	700 m
	UFIP – 100% de remplissage (2019)	750 m	592 m	430 m
TO4	INERIS – 100 % de remplissage (EDD 2013)	1560 m	1270 m	980 m
	INERIS – 47% de remplissage	1100 m	900 m	690 m
	UFIP – 100% de remplissage (2019)	1056 m	840 m	623 m

Le tableau ci-dessus permet de mettre en évidence une nette diminution des distances d'effets calculées en utilisant le modèle UFIP.

4.3 Représentation graphique

Les zones d'effets sont représentées sur les cartes ci-après.

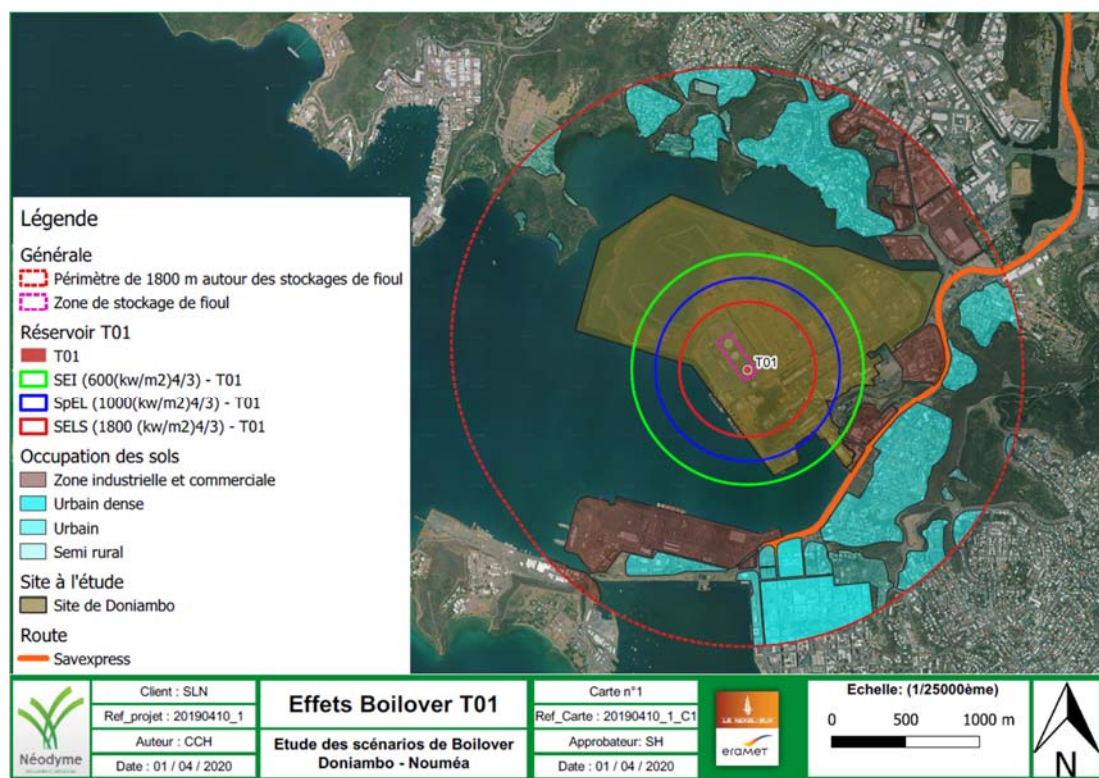


Figure 7 : Cartographie des effets d'un boil-over sur le réservoir T01

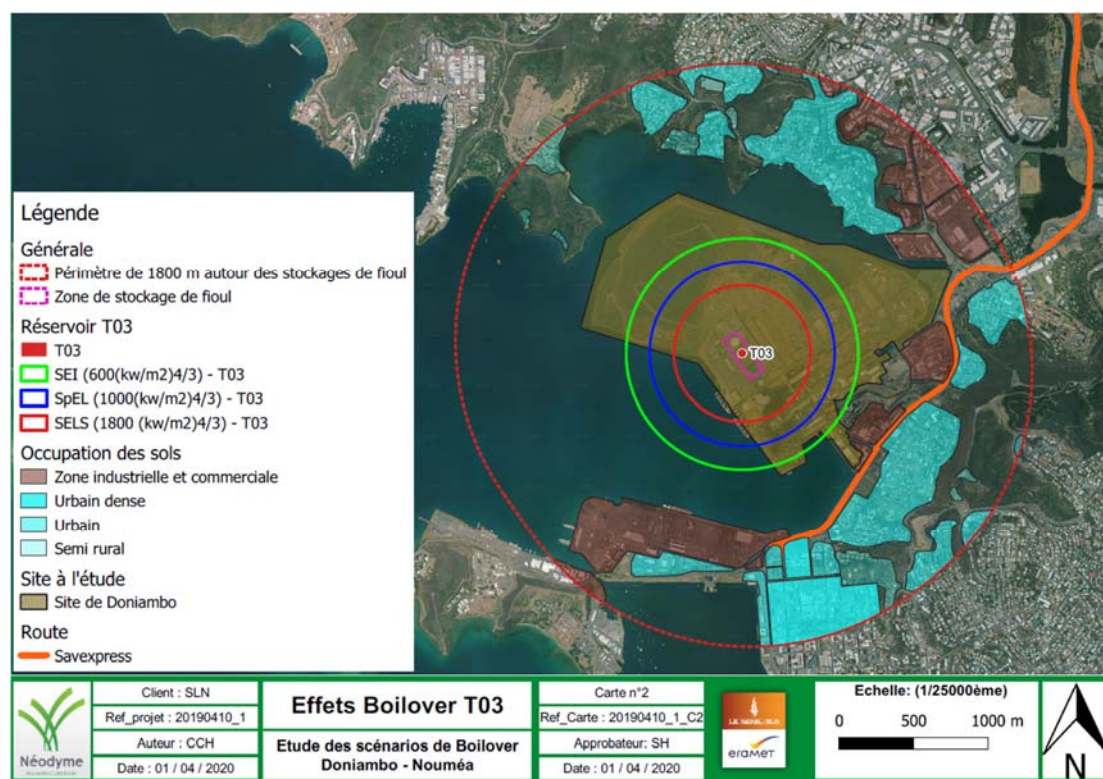


Figure 8 : Cartographie des effets d'un boil-over sur le réservoir T03

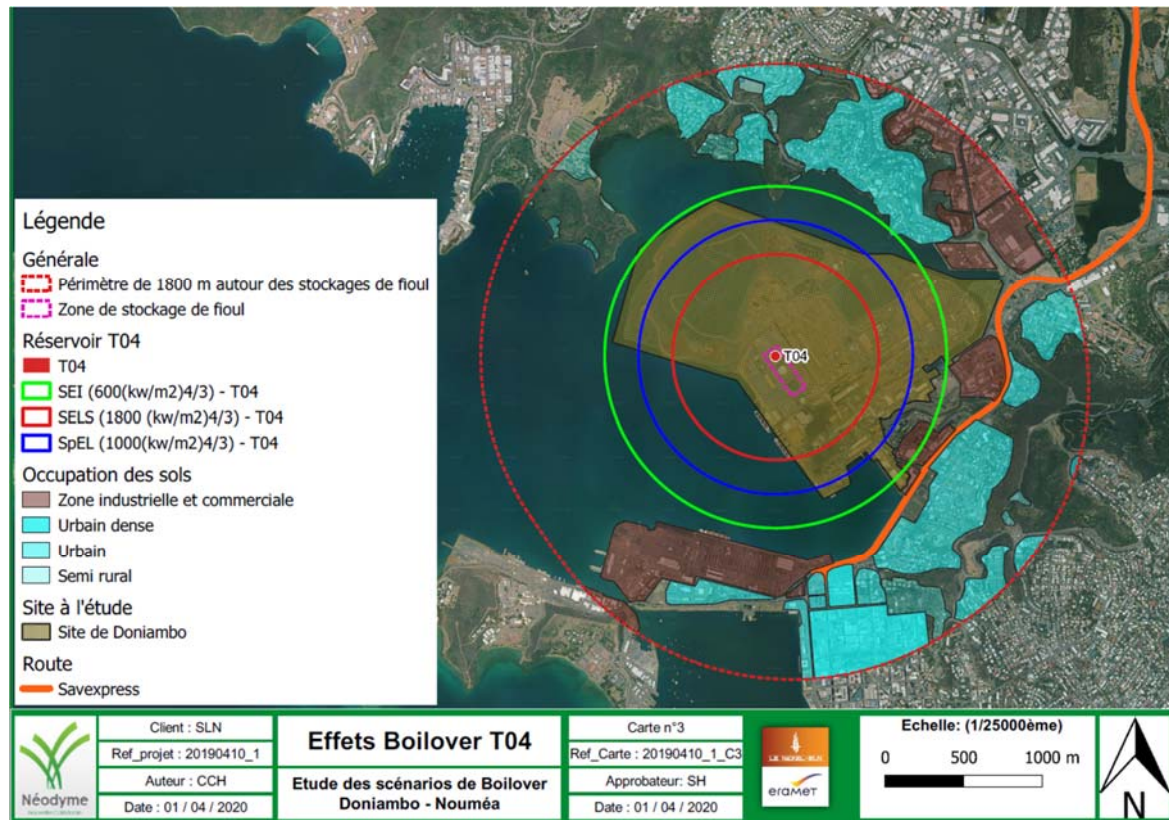


Figure 9 : Cartographie des effets d'un boil-over sur le réservoir T04

5 ESTIMATION DE LA CRITICITE

La criticité est la combinaison de la gravité du scénario (cibles) avec la probabilité de survenue de celui-ci. Ce critère est évalué selon la grille d'appréciation définie dans l'arrêté du 10 mai 2010. La criticité tient également compte de la cinétique de survenue de l'événement redouté.

5.1 Estimation de la gravité

Afin de déterminer la gravité du phénomène, il est nécessaire de déterminer le nombre de personnes impactées, c'est à dire le nombre de personnes pouvant être soumises à des effets au-delà des SEI, SEL ou SELS. Le classement est effectué selon l'échelle de gravité des enjeux humains proposée par l'arrêté du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation.

Valeur de la gravité G/personne	Zone délimitée par le seuil des effets létaux significatifs	Zone délimitée par le seuil des effets létaux	Zone délimitée par le seuil des effets irréversibles sur la vie humaine
5- Désastreux	Plus de 10 personnes exposées	Plus de 100 personnes exposées	Plus de 1 000 personnes exposées
4- Catastrophique	Moins de 10 personnes exposées	Entre 10 et 100 personnes exposées	Entre 100 et 1 000 personnes exposées
3- Important	Au plus 1 personne exposée	Entre 1 et 10 personnes exposées	Entre 10 et 100 personnes exposées
2- Sérieux	Aucune personne exposée	Au plus 1 personne exposée	Moins de 10 personnes exposées
1- Modérée	Pas de zone de létalité hors de l'établissement		Présence humaine exposée à des effets irréversibles inférieure à « une personne »
Personne exposée : en tenant compte le cas échéant des mesures constructives visant à protéger les personnes contre certains effets et la possibilité de mise à l'abri des personnes en cas d'occurrence d'un phénomène dangereux si la cinétique de ce dernier et de la propagation de ses effets le permettent.			

Afin de calculer le nombre de personnes exposées, les zones d'occupation des sols sont déterminées avec les ratios suivants :

- ✔ Semi-rural : 30 personnes /hectare (zone portuaire, habitat dispersé) ;
- ✔ Urbain : 50 personnes / hectare (zone d'habitation) ;
- ✔ Urbain dense : 500 personnes / hectare (tour Pacific Plaza, tour Pacific Arcade) ;
- ✔ Voie express : 300 personnes / km /voie de circulation (VDO) avec 4 voies de circulation ;
- ✔ Les personnes sur les voies secondaires sont incluses dans les densités des zones homogènes.

Les ratios indiqués ont été adaptés pour la Nouvelle-Calédonie, depuis la circulaire du 10 mai 2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003.

L'adaptation a été réalisée en se basant sur le recensement de l'ISEE datant de 2009 et les zones homogènes sont présentées sur la carte ci-après (tirée de l'étude de danger de 2013).

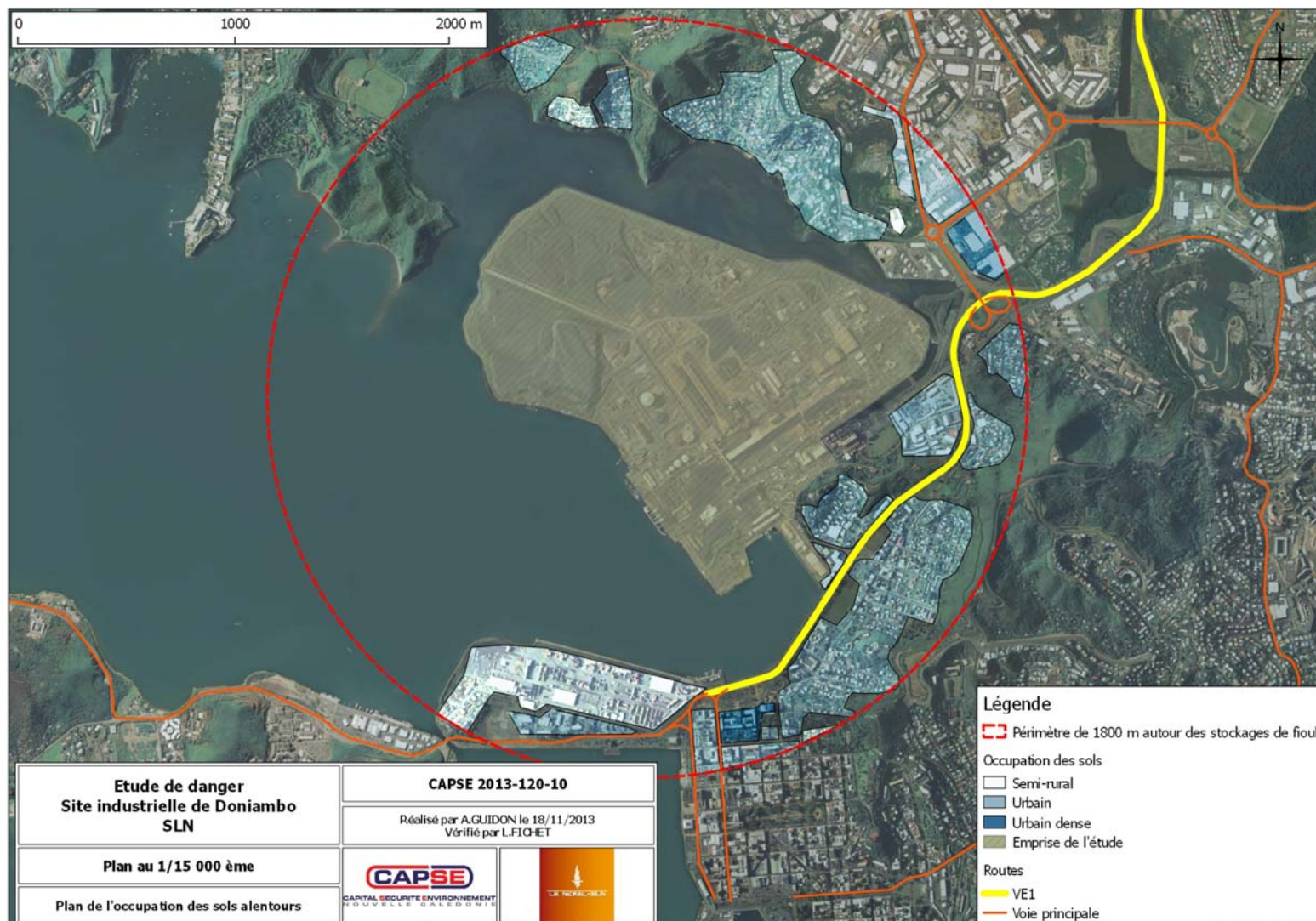


Figure 10 : Cartographie de l'occupation des sols (source : EDD 2013)

Les tableaux ci-dessous permettent de déterminer le nombre de personnes susceptibles d'être présentes dans les zones de danger et ainsi déterminer la gravité des scénarios.

- **Réservoir TO1**

Nombre de personnes exposées au boil-over TO1	Zone d'occupation	Surface longueur	Nombre pers.	Total	Gravité
Zone des SELS	Semi-rural	0	0	0	Modéré
	Urbain/industriel	0	0		
	Urbain dense	0	0		
	Voie express	0	0		
Zone des SEL	Semi-rural	0	0	0	Modéré
	Urbain/industriel	0	0		
	Urbain dense	0	0		
	Voie express	0	0		
Zone des SEI	Semi-rural	0	0	15,5	Important
	Urbain/industriel	0,31 ha	15,5		
	Urbain dense	0	0		
	Voie express	0	0		

Tableau 11 : Evaluation de la gravité du scénario de boil-over sur le réservoir TO1

Le niveau de gravité pour le scénario boil-over du réservoir TO1 est : Important.

- **Réservoir TO3**

Nombre de personnes exposées au boil-over TO3	Zone d'occupation	Surface longueur	Nombre pers.	Total	Gravité
Zone des SELS	Semi-rural	0	0	0	Modéré
	Urbain/industriel	0	0		
	Urbain dense	0	0		
	Voie express	0	0		
Zone des SEL	Semi-rural	0	0	0	Modéré
	Urbain/industriel	0	0		
	Urbain dense	0	0		
	Voie express	0	0		
Zone des SEI	Semi-rural	0	0	0	Modéré
	Urbain/industriel	0	0		
	Urbain dense	0	0		
	Voie express	0	0		

Tableau 12 : Evaluation de la gravité du scénario de boil-over sur le réservoir TO3

Le niveau de gravité pour le scénario boil-over du réservoir TO3 est : Modéré.

- **Réservoir TO4**

Nombre de personnes exposées au boil-over TO4	Zone d'occupation	Surface longueur	Nombre pers.	Total	Gravité
Zone des SELS	Semi-rural	0	0	0	Modéré
	Urbain/industriel	0	0		
	Urbain dense	0	0		
	Voie express	0	0		
Zone des SEL	Semi-rural	0	0	0	Modéré
	Urbain/industriel	0	0		
	Urbain dense	0	0		
	Voie express	0	0		
Zone des SEI	Semi-rural	0 ha	0	170,5	Catastrophique
	Urbain/industriel	3,41 ha	170,5		
	Urbain dense	0	0		
	Voie express	0	0		

Tableau 13 : Evaluation de la gravité du scénario de boil-over sur le réservoir TO4

Le niveau de gravité pour le scénario boil-over du réservoir TO4 est : Catastrophique.

5.2 Estimation de la probabilité

La survenue d'un boil-over dépend de plusieurs facteurs que l'on retrouve dans le nœud papillon proposé dans le guide bleu de l'UFIP.

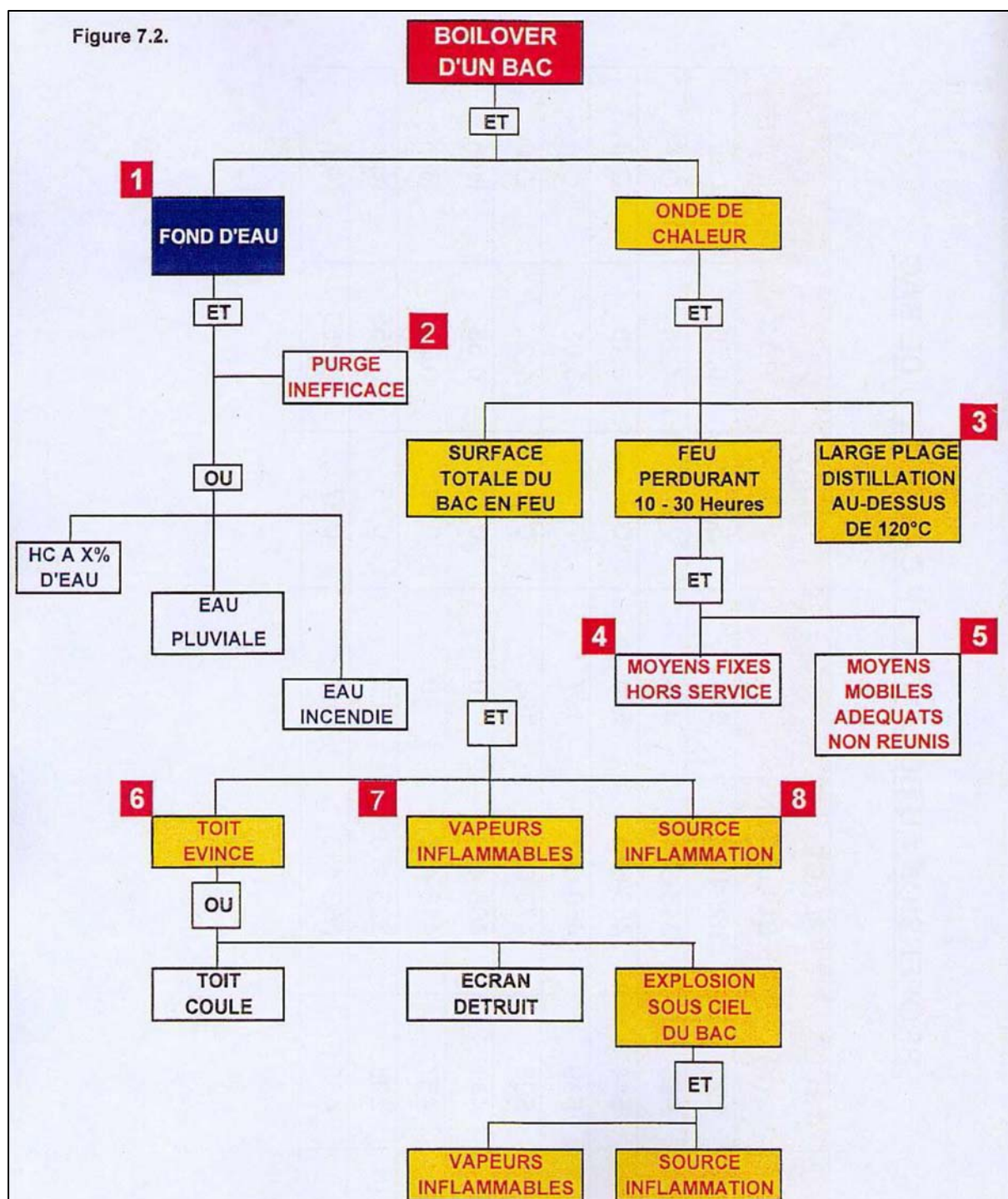


Figure 11 : Nœud-papillon du boil-over (source : guide bleu de l'UFIP)

Le phénomène de boil-over résulte en général de la combinaison d'événements redoutés. La probabilité de survenue d'un tel phénomène est estimée à 9.10^{-6} /an (source guide GTDLI 2008).

L'échelle de cotation retenue est l'échelle proposée dans l'arrêté métropolitain du 29 septembre 2005 :

Classe de probabilité	Désignation	Echelle qualitative	Echelle quantitative (par unité et par an)
A	Courant	Susceptible de se produire pendant la vie de l'installation	<div> $\lambda = 10^{-2}$ </div> <div> $\lambda = 10^{-3}$ </div> <div> $\lambda = 10^{-4}$ </div> <div> $\lambda = 10^{-5}$ </div>
B	Probable	Peut se produire pendant la durée de vie de l'installation	
C	Improbable	S'est déjà produit.	
D	Très improbable	Déjà rencontré, mais corrigé depuis	
E	Possible mais extrêmement peu probable	Jamais rencontré sur un grand nombre d'installation dans le monde	

Figure 12 : Echelle de probabilité de l'arrêté du 29/09/2005

Le phénomène boil-over est donc classé : **E- Extrêmement peu probable**

5.3 Détermination de la criticité

Afin d'évaluer les enjeux humains des scénarios, il a été décidé de s'inspirer de la grille de criticité issue de la circulaire métropolitaine du 10 mai 2010 relative aux critères d'appréciation de la démarche de maîtrise des risques d'accidents susceptibles de survenir dans les établissements.

Les scénarios retenus sont positionnés sur les matrices ci-après :

Gravité	Probabilité (sens croissant de E vers A)				
	E	D	C	B	A
5. Désastreux	MMR rang 2	NON rang 1	NON rang 2	NON rang 3	NON rang 4
4. Catastrophique	MMR rang 1 Boilover TO4	MMR rang 2	NON rang 1	NON rang 2	NON rang 3
3. Important	MMR rang 1 Boilover TO1	MMR rang 1	MMR rang 2	NON rang 1	NON rang 2
2. Sérieux	Acceptable Boilover TO3	Acceptable	MMR rang 1	MMR rang 2	NON rang 1
1. Modéré	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable	MMR rang 1

Figure 13 : Matrice de criticité des scénarios de boil-over

5.4 Cinétique

Les délais de survenue des boil-over pour les réservoirs pleins sont compris entre 49 et 79 h. Ce délai permet de considérer le phénomène comme différé. Ce temps permet de tenter plusieurs extinctions du feu de réservoir et de mettre les populations à l'abri.

Les temps de déclenchement déterminés dans cette étude sont nettement plus importants que dans l'étude CAPSE 2013-120-10-SC4-rév3. Cette différence tient du choix du modèle utilisé. En effet, le modèle utilisé ici propose le calcul de la température de l'onde de chaleur devant traverser les couches d'hydrocarbures pour atteindre la lame d'eau présente en fond de réservoir, quand le modèle précédemment utilisé considère une température de 200°C.

Le calcul de la température de l'onde de chaleur selon le modèle UFIP, et basé sur les plages de distillations du fioul, conduit à une valeur de 560°C, or plus cette température est élevée, et plus le temps pour traverser chaque couche est important, induisant un temps de déclenchement in fine plus important.

En outre, si le temps de combustion avant déclenchement est important, alors moins de fioul participe à la boule de feu, et donc les distances d'effets en sont réduites.

6 MESURES DE MAITRISE DES RISQUES

En termes de mesures de maîtrise des risques, la SLN dispose de plusieurs mesures de prévention et de protection.

Les mesures de prévention pour éviter le phénomène de Boil over sont les consignes et modes opératoires qui sont rédigés, mis en place, et suivis de manière régulière par le personnel SLN, notamment, par des purges d'eau en pied de bac.

Les mesures de protection pour limiter l'occurrence et les conséquences du phénomène de Boil over sont de type :

- ✔ Moyens de lutte contre l'incendie pour extinction (l'extinction du feu de réservoir prévenant le déclenchement du boil-over) et refroidissement ;
- ✔ Évacuation des populations potentiellement exposées ;
- ✔ Sirène d'alerte et information des populations dans la zone de danger ;
- ✔ Mise en œuvre du PPI.

Défense incendie

Des moyens de lutte contre l'incendie sont mis en place afin d'assurer la protection des réservoirs. La protection incendie a été décrite dans le document « Feu de bac – Site de Doniambo – CAPSE 2013-120-10-SC2 ».

Il est montré que la SLN est en mesure d'éteindre un feu qui surviendrait sur un des réservoirs avec ses moyens fixes (Boîtes à mousse pour les réservoirs TO1, TO3 et TO4).

Les réservoirs TO1 et TO3 sont également protégés par 2 canons qui peuvent se substituer aux boîtes à mousse. Le réservoir TO4 est protégé par un seul canon qui ne peut que partiellement se substituer aux boîtes à mousse.

Diminution des zones d'effets

Les distances d'effets sont directement liées à la quantité de fioul stocké au moment du boil-over. La diminution des quantités stockées permet de réduire les zones de dangers et donc les cibles potentielles.

L'analyse des distances d'effets en fonction des quantités stockées donne les résultats suivants :

Réservoir	Aucun SEI hors site	Capacité	SEI limités Doniambo	Capacité
T04	49 200 m ³	82%	60 000 m ³	100%
T03	28 000 m ³	100%	28 000 m ³	100%
T01	26 320 m ³	94%	28 000 m ³	100%
Total	103 520 m ³	89,2%	116 000 m ³	100%

Tableau 14 : Evaluation des conséquences en fonction du remplissage des réservoirs

Dans tous les cas, aucun SEI ne sort du quartier Doniambo.

La solution consistant à réduire le niveau de remplissage pour garantir des SEI limités à l'intérieur du site ne semble difficilement réalisable. En effet, à ce jour, les limites imposées à la SLN sont déjà techniquement et économiquement difficiles à soutenir et correspondent à un volume total stocké (87 437m³ selon l'étude CAPSE 2013-120-10-SC4-rév3).

Par ailleurs, dans la précédente version de cette fiche scénario de l'étude CAPSE 2013-120-10-SC4-rév3, les limites de référence pour définir le niveau de remplissage maximum dans les réservoirs correspondaient à une zone impactée par les SEI limitée au quartier de Doniambo. En appliquant les mêmes limites, la SLN pourraient opérer les réservoirs objet de cette étude à un niveau de remplissage de 100% à niveau de risque équivalent.

A noter en complément que les temps de déclenchement recalculés sont supérieurs à ceux définis dans l'étude CAPSE 2013-120-10-SC4-rév3, offrant ainsi une marge de manœuvre supérieure pour l'intervention et le cas échéant pour le déclenchement du PPI.

7 CONCLUSION

Les scénarios « Boil-over » sont majorants en termes d'effets, néanmoins leur cinétique différée permet d'envisager plusieurs moyens d'extinctions de l'incendie avant la survenue du phénomène.

La méthode employée dans la présente étude diffère de celle utilisée dans la précédente étude de danger qui avait préconisé la diminution des quantités de fioul stocké dans les réservoirs TO4 (47% de capacité) et TO1 (86% de capacité) afin de maintenir des zones d'effets irréversibles limités au quartier de Doniambo.

Les nouveaux résultats de modélisation indiquent qu'à 100% de capacité, les zones des effets irréversibles restent inscrites dans ces mêmes limites. Considérant en outre le délai les temps de déclenchement, allant de 49h à 79h fonction du réservoir concerné, on peut raisonnablement envisager une intervention sur feu de réservoir réussie, ou en recours ultime, l'évacuation des populations potentiellement exposées.

A noter également que la probabilité d'un tel scénario peut être considérée comme extrêmement peu probable compte tenu de l'historique des accidents similaires.

Enfin, l'ensemble des moyens de surveillance (purges de l'eau, suivi des niveaux...) et des moyens d'extinction permettent de réduire les possibilités de développement d'un tel scénario.