



RAPPORT D'ÉTUDE
N° DRA-18-171215-05612B

20/03/2020

DRA04 – opération A
Guide pour la prise en compte des
centrales à biomasse dans la
rédaction d'une étude de dangers

Version finale

**Guide pour la prise en compte des centrales à biomasse
dans la rédaction d'une étude de dangers**
Version finale

Direction des Risques Accidentels
Verneuil-en-Halatte (60)

Destinataire : Ministère de la Transition Écologique et Solidaire

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Céline DUPUIS, Christophe DUVAL,
Sébastien EVANNO, Souhila KRIBI, Guillaume LECOQ, Gaëtan PROD'HOMME

PRÉAMBULE

Le présent document a été établi sur la base des informations transmises à l'Ineris. La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations fournies.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du présent document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La prestation ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser le document après cette date.

L'établissement du présent document et la prestation associée sont réalisés dans le cadre d'une obligation de moyens.

Au vu de la mission qui incombe à l'Ineris au titre de l'article R131-36 du Code de l'environnement, celui-ci n'est pas décideur. Ainsi, les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre de cette prestation ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur. Par conséquent la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du présent document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour toute utilisation du document en dehors de son objet.

En cas de contradiction entre les conditions générales de vente et les stipulations du présent préambule, les stipulations du présent préambule prévalent sur les stipulations des conditions générales de vente.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION.....	5
1.1	Contexte	5
1.2	Champ d'application.....	6
1.2.1	Installations et combustibles concernés.....	6
1.2.3	Rubriques Installations classées.....	8
1.3	Utilisation du présent guide	12
2	DECOUPAGE FONCTIONNEL DES INSTALLATIONS ET IDENTIFICATION DES POTENTIELS DE DANGERS.....	15
2.1	Description des installations et découpage fonctionnel	15
2.2	Potentiers de dangers liés aux substances.....	18
2.2.1	Dangers liés à la biomasse.....	18
2.2.2	Dangers liés au fioul et au gaz.....	19
2.3	Potentiers de dangers liés aux équipements et aux procédés	21
2.3.1	Dangers liés au stockage, à la manutention et à l'utilisation de biomasse 21	
2.3.2	Dangers liés à la chaudière à combustible biomasse	22
2.3.3	Synthèse des potentiels de dangers liés aux équipements et aux procédés	23
2.4	Réduction des potentiels de dangers	25
2.4.1	Réduction de l'empoussièrement.....	25
2.4.2	Réduction des sources d'inflammation	26
2.4.3	Réduction de la fermentation ou de l'auto-échauffement du combustible.....	27
2.4.4	Réduction des risques de propagation d'une explosion	28
2.4.5	Réduction des risques d'explosion au niveau de la chaudière	28
3	ANALYSE DU RETOUR D'EXPERIENCE	29
3.1	Généralités.....	29
3.2	Retour d'expérience spécifique aux chaudières	29
3.3	Retour d'expérience spécifique aux autres installations	30
3.3.1	REX spécifique aux équipements de préparation du combustible.....	30
3.3.2	REX spécifique au stockage du combustible	31
3.4	REX spécifique aux équipements de transfert du combustible	31
3.4.1	REX spécifique à la gestion des cendres.....	32
3.4.2	REX spécifique au dépoussiérage	32
4	ANALYSE DE RISQUES ET SCENARIOS D'ACCIDENT	33
4.1	Introduction	33
4.2	Événements redoutés centraux et phénomènes dangereux associés retenus	34
4.3	Barrières de sécurité	37
4.4	Synthèse des scénarios d'accident retenus	38

4.4.1	Préalable sur les scénarios d'accidents majeurs retenus	38
4.4.2	Silos	39
4.4.3	Explosion d'un espace bâtementaire	45
4.4.4	Chaudière.....	47
5	CARACTERISATION DE L'INTENSITE DES PHENOMENES DANGEREUX	51
5.1	Synthèse des phénomènes dangereux modélisés	51
5.2	Principales hypothèses de modélisation.....	53
5.2.1	Généralités	53
5.2.2	Caractéristiques des silos.....	53
5.2.3	Caractéristiques des chaudières.....	54
5.3	Présentation des modèles utilisés	55
5.4	Seuils d'effets sur l'homme	55
5.5	Résultats.....	56
5.5.1	Incendie de silos.....	56
5.5.2	Explosion de silos.....	57
5.5.3	Explosion de la chambre de combustion d'une chaudière	57
5.5.4	BLEVE de la capacité d'eau d'une chaudière	57
6	ELEMENTS POUR LA CARACTERISATION DES PROBABILITES	59
6.1	Présentation des méthodologies de caractérisation de la probabilité	59
6.1.1	Étape 1 : Choix d'une méthode d'estimation de la probabilité.....	60
6.1.2	Étape 2 : Collecte des données d'entrées nécessaires à l'estimation de la probabilité	61
6.1.3	Étape 3 : Agrégation des données le long du nœud papillon et affectation d'une classe de probabilité d'occurrence.....	61
6.2	Données utilisables dans le cas des chaufferies à biomasse	61
6.2.1	Fréquences de certains EI / ERC / PhD propres aux silos	61
6.2.2	Fréquences de certains EI / ERC / PhD propres aux chaudières	64
7	CARACTERISATION DE LA CINETIQUE DES EVENEMENTS	67
8	EFFETS DOMINOS	69
9	CONCLUSION	71
10	ABREVIATIONS	73
11	REFERENCES	75
12	LISTE DES ANNEXES	77

1 INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE

Les réflexions menées sur la proportionnalité dans les Études de Dangers (EDD) ont conduit à la volonté de rédiger des guides visant à faciliter la rédaction ou l'instruction des EDD pour des sites sur lesquels se trouvent des installations jugées suffisamment génériques.

Ce rapport s'inscrit dans ce cadre. Il traite des chaufferies à combustibles solides de type biomasse et de leurs installations connexes, présentes dans les sites industriels pour leur besoin de chaleur, mais également comme unité autonome pour la production de chaleur voire d'électricité pour les habitations.

Les installations concernées sont :

- les installations de stockage de la biomasse ;
- les installations de préparation (broyage, tamisage) et de transfert (transporteurs) des combustibles de type biomasse ;
- les chaudières à vapeur, à tubes d'eau ou tubes de fumées utilisant des combustibles solides de type biomasse.

A noter que l'article L211-2 du Code de l'Energie définit la biomasse comme étant la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales issues de la terre et de la mer, de la sylviculture et des industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers.

Ces installations de stockage et ces installations de combustion peuvent être classées sous le régime de l'autorisation, auquel cas elles font l'objet d'une EDD.

Un premier objectif du document est de fournir des éléments pour faciliter la réalisation des EDD des chaufferies ou des sites comportant ces installations, ainsi que leur instruction. Notamment, des informations sur l'état de l'art, les phénomènes dangereux et accidents majeurs pouvant être générés par le stockage de biomasse dans des silos ou par une chaudière, les distances d'effets types, les probabilités types des événements, etc. sont présentées. Différents volets de l'EDD pourront ainsi s'appuyer sur des éléments développés dans ce guide.

Un second objectif est d'améliorer la maîtrise du risque à la source. Aussi, le guide comporte des informations sur les bonnes pratiques de conception et de maîtrise de risque en intégrant les barrières techniques et humaines de sécurité. Ces informations visent à faciliter la mise en œuvre et l'inspection de ces mesures.

Ce document relatif au guide d'étude de dangers d'installations de chaufferie biomasse s'appuie notamment sur :

- des références bibliographiques ;
- l'expertise de l'INERIS dans l'évaluation des risques d'incendie et d'explosion de chaufferies biomasse, notamment issues de la réalisation d'études de dangers, de tierces expertises et d'études d'évaluation du risque ATEX pour des professionnels de la filière chaufferie biomasse ;
- la participation de l'INERIS au Groupe de travail « Sécurité » animé par le Comité Interprofessionnel du Bois-Energie (CIBE).

Remarques :

- Ce guide vise à présenter des informations aussi complètes et représentatives de la réalité du terrain que possible. Il a vocation à être évolutif, c'est-à-dire à pouvoir être actualisé sur la base des retours des différents lecteurs.
- Les textes réglementaires encadrant l'exploitation des installations de combustion ont été revus pour intégrer les Meilleures Techniques Disponibles (MTD) formulées pour les grandes installations de combustion. Le recours aux MTD est un des principes directeurs de la directive relative aux émissions industrielles (Directive IED) afin de prévenir les pollutions de toutes natures (aspects chroniques). Une EDD visant à prévenir les risques accidentels générés par une ICPE, les MTD relatives aux installations de combustion ne seront pas étudiées plus en détail dans ce guide.
- Ce guide pourrait être utilement complété par les recommandations qui peuvent être formulées par les assureurs ou celles issues d'analyses de risques.

1.2 CHAMP D'APPLICATION

1.2.1 INSTALLATIONS ET COMBUSTIBLES CONCERNES

Ce guide concerne les chaudières utilisant des combustibles solides de type biomasse telle que définie dans la rubrique 2910 de la nomenclature des ICPE, à savoir :

- les produits composés d'une matière végétale agricole ou forestière susceptible d'être employée comme combustible en vue d'utiliser son contenu énergétique ;
- les déchets ci-après :
 - i. déchets végétaux agricoles et forestiers ;
 - ii. déchets végétaux provenant du secteur industriel de la transformation alimentaire, si la chaleur produite est valorisée ;
 - iii. déchets végétaux fibreux issus de la production de pâte vierge et de la production de papier à partir de pâte, s'ils sont co-incinérés sur le lieu de production et si la chaleur produite est valorisée ;
 - iv. déchets de liège ;
 - v. déchets de bois, à l'exception des déchets de bois qui sont susceptibles de contenir des composés organiques halogénés ou des métaux lourds à la suite d'un traitement avec des conservateurs du bois ou du placement d'un revêtement, tels que les déchets de bois de ce type provenant de déchets de construction ou de démolition.

Les installations liées au stockage, au transport ainsi qu'au broyage éventuel de biomasse en amont de la combustion sont également étudiées dans ce guide. La description de ces installations est détaillée au § 2.1.

Ce guide couvre les typologies de chaudière à vapeur, à tubes d'eau et à tubes de fumées alimentées par de la biomasse. Sont notamment exclues du champ de l'étude les fours industriels destinés au réchauffage direct de produits, ainsi que les unités d'incinération de déchets.

Le périmètre du guide comprend les chaudières qui fournissent :

- de l'eau surchauffée (par exemple une chaufferie reliée à des réseaux de chaleur) ;
- de la vapeur saturée (par exemple pour les besoins en calories de process industriels) ;
- de la vapeur surchauffée (par exemple pour la génération d'électricité).

La gamme de puissance thermique nominale couverte par le guide s'étend de plusieurs centaines de kilowatts à 50 MWth. Ce champ couvre actuellement la majorité des chaudières à biomasse existantes ou en projet.

Remarques :

Le guide exclut les points suivants :

- Les silos enterrés ;
- Les produits tels que charbon de bois, houille, coke, lignite, goudron, asphalte, brais et matières bitumineuses ;
- Les installations de traitement thermique des déchets ;
- Les installations de traitement de l'eau alimentaire de la chaudière. Une description succincte du principe des traitements externe et interne des eaux de chaudière est présentée en Annexe A. Les risques induits par ces dispositifs de traitement sont à étudier par ailleurs dans le cadre de l'EDD.
- Les installations de traitement des fumées de combustion (ex : traitement des oxydes d'azote -NOx-, traitement des oxydes de soufre, dépoussiérage, etc.). Une présentation succincte des dispositifs de traitement des fumées se trouve en Annexe A. Les risques induits par ces dispositifs sont à étudier par ailleurs dans le cadre de l'EDD (ex : explosion de poussières ou incendie dans le filtre à manches).

Par ailleurs, même si les résultats des modélisations des scénarios d'accidents présentés dans le présent guide ne sont a priori pas valables pour les grandes installations de combustion (puissance thermique nominale supérieure à 50 MWth), les scénarios d'accidents présentés restent applicables sur une gamme de puissance plus large, allant jusqu'à plusieurs centaines de mégawatts.

1.2.3 RUBRIQUES INSTALLATIONS CLASSEES

Les chaudières à biomasse et les installations de stockage et de préparation de combustible qui y sont liées peuvent relever des rubriques détaillées dans le tableau ci-après. Pour rappel, les chaudières pouvant fonctionner au charbon sont exclues de ce guide.

Les installations de traitement thermique de déchets dangereux ou non dangereux pouvant relever des rubriques 2770 ou 2771 ainsi que les installations de production de chaleur à partir de déchets non dangereux préparés sous forme de combustibles solides de récupération relevant de la rubrique 2971 ne sont pas traitées dans le cadre de ce rapport.

Activités concernées	N° rubrique	Désignation de la rubrique	Régime
Stockage de bois	1532 ¹²	Bois ou matériaux combustibles analogues y compris les produits finis conditionnés et les produits ou déchets répondant à la définition de la biomasse et visés par la rubrique 2910-A, ne relevant pas de la rubrique 1531 (stockage de), à l'exception des établissements recevant du public.	A
		Le volume susceptible d'être stocké étant : 1. Supérieure à 50 000 m ³	E
		2. Supérieur à 20 000 m ³ mais inférieur ou égal à 50 000 m ³	D
Stockage de biomasse <u>hors bois</u>	2160 ³	Silos et installations de stockage en vrac de céréales, grains, produits alimentaires ou tout produit organique dégageant des poussières inflammables, y compris les stockages sous tente ou structure gonflable. Les critères caractérisant les termes silo, silo plat, tente et structure gonflable sont précisés par arrêtés ministériels	E
		1. Silos plats a) si le volume total de stockage est supérieur à 15 000 m ³	DC
		1. Silos plats b) si le volume total de stockage est supérieur à 5 000 m ³ , mais inférieur ou égal à 15 000 m ³	A
		2. Autres installations : a) si le volume total de stockage est supérieur à 15 000 m ³	DC
		2. Autres installations : b) si le volume total de stockage est supérieur à 5 000 m ³ , mais inférieur ou égal à 15 000 m ³	

¹ La rubrique 1531 intitulée « Stockages, par voie humide (immersion ou aspersion), de bois non traité chimiquement, la quantité stockée étant supérieure à 1 000 m³ » peut être pertinente dans le cas de stockages de bois qui seraient en amont du stockage de bois sec, mais ne concerne pas le stockage de bois en silos ou hangar lié au fonctionnement de la chaudière à combustibles solides.

La note IR_2017.03_boissilos de la DGPR indique que « *Le classement de bois, indépendamment des conditions de stockage, relève de la rubrique 1532* ». [5]

³ Il est supposé que la rubrique 1450 sur le stockage des solides inflammables est moins pertinente dans le cas de la biomasse de type « produits agricoles ».

Activités concernées	N° rubrique	Désignation de la rubrique	Régime
Installations de préparation de biomasse ⁴	2260	Broyage, concassage, criblage, déchetage, ensachage, pulvérisation, trituration, granulation, nettoyage, tamisage, blutage, mélange, épluchage et décortication des substances végétales et de tous produits organiques naturels, y compris la fabrication d'aliments composés pour animaux, mais à l'exclusion des activités visées par les rubriques 2220, 2221 ou 3642. La puissance maximum de l'ensemble des machines fixes pouvant concourir simultanément au fonctionnement de l'installation étant : a) la puissance installée de l'ensemble des machines fixes concourant au fonctionnement de l'installation étant supérieure à 500 kW	A
		b) la puissance installée de l'ensemble des machines fixes concourant au fonctionnement de l'installation étant supérieure à 100 kW mais inférieure ou égale à 500 kW	D
Chaudière (jusqu'au 20/12/2018)	2910-A (*)	Combustion à l'exclusion des installations visées par les rubriques 2770, 2771 et 2971. A. Lorsque l'installation consomme exclusivement, seuls ou en mélange, du gaz naturel, des gaz de pétrole liquéfiés, du fioul domestique, du charbon, des fiouls lourds, de la biomasse telle que définie au a) ou au b)i) ou au b)iv) de la définition de biomasse, des produits connexes de scierie issus du b)v) de la définition de biomasse ou lorsque la biomasse est issue de déchets au sens de l'article L541-4-3 du code de l'environnement, à l'exclusion des installations visées par d'autres rubriques de la nomenclature pour lesquelles la combustion participe à la fusion, la cuisson ou au traitement, en mélange avec les gaz de combustion, des matières entrantes, si la puissance thermique nominale de l'installation est : 1. Supérieure ou égale à 20 MW	A
		2. Supérieure à 2 MW, mais inférieure à 20 MW	DC
Chaudière (jusqu'au 20/12/2018)	2910-B (*)	Combustion à l'exclusion des installations visées par les rubriques 2770, 2771 et 2971. B. Lorsque les produits consommés seuls ou en mélange sont différents de ceux visés en A et C ou sont de la biomasse telle que définie au b)ii) ou au b)iii) ou au b)v) de la définition de biomasse, et si la puissance thermique nominale de l'installation est : 1. Supérieure ou égale à 20 MW	A
		2. Supérieure à 0,1 MW mais inférieure à 20 MW : a) en cas d'utilisation de biomasse telle que définie au b)ii) ou au b)iii) ou au b)v) de la définition de biomasse, ou de biogaz autre que celui visé en 2910-C, ou de produit autre que la biomasse issue de déchets au sens de l'article L541-4-3 du code de l'environnement	E
		2. Supérieure à 0,1 MW mais inférieure à 20 MW : b) dans les autres cas	A
Chaudière (à partir du 20/12/2018)	2910-A (*)	Combustion à l'exclusion des activités visées par les rubriques 2770, 2771, 2971 ou 2931 et des installations classées au titre de la rubrique 3110 ou au titre d'autres rubriques de la nomenclature pour lesquelles la combustion participe à la fusion, la cuisson ou au traitement, en mélange avec les gaz de combustion, des matières entrantes A. Lorsque sont consommés exclusivement, seuls ou en mélange, du gaz naturel, des gaz de pétrole liquéfiés, du biométhane, du fioul	E

⁴ Dans le cas des déchets (hors guide), il est précisé que le prétraitement des déchets destinés à l'incinération peut également relever des rubriques 3531 ou 3532 (selon la capacité de l'installation de prétraitement).

Activités concernées	N° rubrique	Désignation de la rubrique	Régime
		domestique, du charbon, des fiouls lourds, de la biomasse telle que définie au a) ou au b) i) ou au b) iv) de la définition de la biomasse, des produits connexes de scierie et des chutes du travail mécanique de bois brut relevant du b) v) de la définition de la biomasse, de la biomasse issue de déchets au sens de l'article L. 541-4-3 du code de l'environnement, ou du biogaz provenant d'installations classées sous la rubrique 2781-1, si la puissance thermique nominale de l'installation est : 1. Supérieure ou égale à 20 MW, mais inférieure à 50 MW	
		2. Supérieure à 2 MW, mais inférieure à 20 MW	DC
Chaudière (à partir du 20/12/2018)	2910-B (*)	Combustion à l'exclusion des installations visées par les rubriques 2770, 2771 et 2971. B. Lorsque sont consommés seuls ou en mélange des produits différents de ceux visés en A, ou de la biomasse telle que définie au b) ii) ou au b) iii) ou au b) v) de la définition de la biomasse : 1. Supérieure ou égale à 20 MW	A
		1. Uniquement de la biomasse telle que définie au b) ii) ou au b) iii) ou au b) v) de la définition de la biomasse, le biogaz autre que celui visé en 2910-A, ou un produit autre que la biomasse issu de déchets au sens de l'article L. 541-4-3 du code de l'environnement, avec une puissance thermique nominale supérieure ou égale à 1 MW, mais inférieure à 50 W	E
		2. Des combustibles différents de ceux visés au point 1 ci-dessus, avec une puissance thermique nominale supérieure ou égale à 0,1 MW, mais inférieure à 50 MW	A
Chaudière	3110	Combustion de combustibles dans des installations d'une puissance thermique nominale totale égale ou supérieure à 50 MW	A

Tableau 1 : Régimes ICPE possibles des chaufferies à biomasse et des installations de stockage

Il est noté que la liste des rubriques identifiées dans le tableau ci-avant n'est pas exhaustive. Des rubriques supplémentaires peuvent être dues notamment :

- aux installations de démarrage au gaz de la chaudière biomasse ;
- aux équipements de manutention (exemple : rubrique 2925 sur les ateliers de charge d'accumulateurs, pour les accumulateurs pouvant être utilisés pour certains engins de manutention).

Les principaux arrêtés correspondants à ces rubriques pour des installations soumises à autorisation sont les suivants :

- **L'arrêté du 18 février 2010** relatif à la prévention des risques accidentels présentés par certaines installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation sous la rubrique n° 2260 ;
- **L'arrêté du 29 mars 2004** modifié relatif à la prévention des risques présentés par les silos de céréales, de grains, de produits alimentaires ou de tout autre produit organique dégageant des poussières inflammables ;
- **L'arrêté du 26 août 2013** relatif aux installations de combustion d'une puissance supérieure ou égale à 20 MW soumises à autorisation au titre de la rubrique 2910 et de la rubrique 2931 qui sera remplacé à partir du 20 décembre 2018 par les arrêtés suivants :
 - **L'arrêté du 3 août 2018** relatif aux installations de combustion d'une puissance thermique nominale totale inférieure à 50 MW soumises à autorisation au titre des rubriques 2910, 2931 ou 3110 ;
 - **L'arrêté du 03 août 2018** relatif aux installations de combustion d'une puissance thermique nominale totale supérieure ou égale à 50 MW soumises à autorisation au titre de la rubrique 3110.

Pour les silos de bois relevant de la rubrique 1532, pour lesquels il n'existe pas d'arrêté de prescriptions relatives aux installations soumises à autorisation, il est préconisé de suivre les prescriptions relatives à la prévention des risques d'incendie et d'explosion des arrêtés applicables aux silos sous la rubrique n°2160.

De manière générale, les arrêtés pour les installations soumises à enregistrement et à déclaration ne sont pas répertoriés dans le cadre de ce guide qui ne concerne que les installations soumises à autorisation ; le cas échéant, l'exploitant devra s'assurer de l'application des AMPG associés.

Remarques :

Il est précisé que bien que les chaudières soumises à enregistrement ou à déclaration ne fassent pas l'objet d'une EDD spécifique, elles sont couvertes par ce guide car il se peut qu'elles soient installées sur un site soumis à autorisation. Or, la circulaire du 4 mai 2007 relative au porter à connaissance sur les risques technologiques précise que pour les sites soumis à autorisation, les phénomènes dangereux issus des installations soumises à déclaration ou non classées sont à prendre en considération en tant que potentiel événement initiateur d'un phénomène dangereux pouvant avoir lieu sur une installation soumise à autorisation.

Par ailleurs, au titre de ladite circulaire, il est également précisé que le porter à connaissance prévu pour les installations soumises à autorisation doit contenir l'ensemble des phénomènes dangereux susceptibles d'être générés par ces installations, ainsi que les seules installations et équipements soumis à déclaration (voire non classés) qui, par leur proximité et leur connexité avec les installations soumises à autorisation, sont de nature à modifier les dangers pour les intérêts visés à l'article L 511-1 du code de l'environnement.

Ainsi, une EDD doit également porter sur les installations soumises à déclaration ou non classées dès lors que, par effets dominos, ces dernières peuvent être à l'origine d'un potentiel phénomène dangereux sur une installation soumise à autorisation ou lorsqu'elles sont susceptibles d'augmenter l'intensité d'un phénomène dangereux de l'installation soumise à autorisation.

1.3 UTILISATION DU PRESENT GUIDE

Ce guide présente des éléments facilitant la rédaction d'une étude de dangers soit des installations de chaufferie elles-mêmes, soit d'un site industriel sur lequel se trouvent des installations de chaufferie dont il faut étudier les potentiels effets dominos.

Ces éléments sont les suivants :

- Découpage fonctionnel des installations de stockage, de transfert et de la chaudière et identification des potentiels de dangers (Chapitre 2) ;
- Analyse du retour d'expérience (Chapitre 3) ;
- Description des scénarios d'accidents majeurs classiquement rencontrés sur les installations de chaufferie et barrières de sécurité associées (Chapitre 4) ;
- Caractérisation de l'intensité des phénomènes dangereux identifiés (Chapitre 5) ;
- Éléments pour la caractérisation de la probabilité d'occurrence des phénomènes dangereux modélisés (Chapitre 6) ;
- Caractérisation de la cinétique des phénomènes dangereux (Chapitre 7) ;
- Etude des effets dominos potentiels (Chapitre 8).

De plus, il présente les annexes informatives suivantes :

- Annexe A : Description des installations des chaufferies à biomasse et potentiels de dangers associés ;
- Annexe B : Combustibles solides de type biomasse : définition, exemples, caractéristiques et risques ;
- Annexe C : Accidentologie des installations de chaufferie à biomasse y compris les installations de stockage et de convoyage ;
- Annexe D : Tableau générique d'analyse de risque ;
- Annexe E : Extrait de la norme NF EN 32-020-1 : Mode d'exploitation des chaufferies : Prescriptions générales de sécurité ;
- Annexe F : Référentiels relatifs aux barrières sur les silos et sur les chaudières ;
- Annexe G : Bonnes pratiques et prescriptions visant à réduire l'empoussièremement des installations et les risques d'explosion et d'incendie des équipements de transfert ;
- Annexe H : Caractérisation de l'intensité des scénarios relatifs aux chaufferies à biomasse ;
- Annexe I : Éléments de probabilité des phénomènes dangereux relatifs aux chaufferies à biomasse.

Le schéma ci-dessous situe ces éléments dans le cadre de la réalisation d'une EDD complète (voir Oméga 9 de l'INERIS). Ce logigramme est construit sur la base du contenu des EDD proposé dans la circulaire du 10 mai 2010.

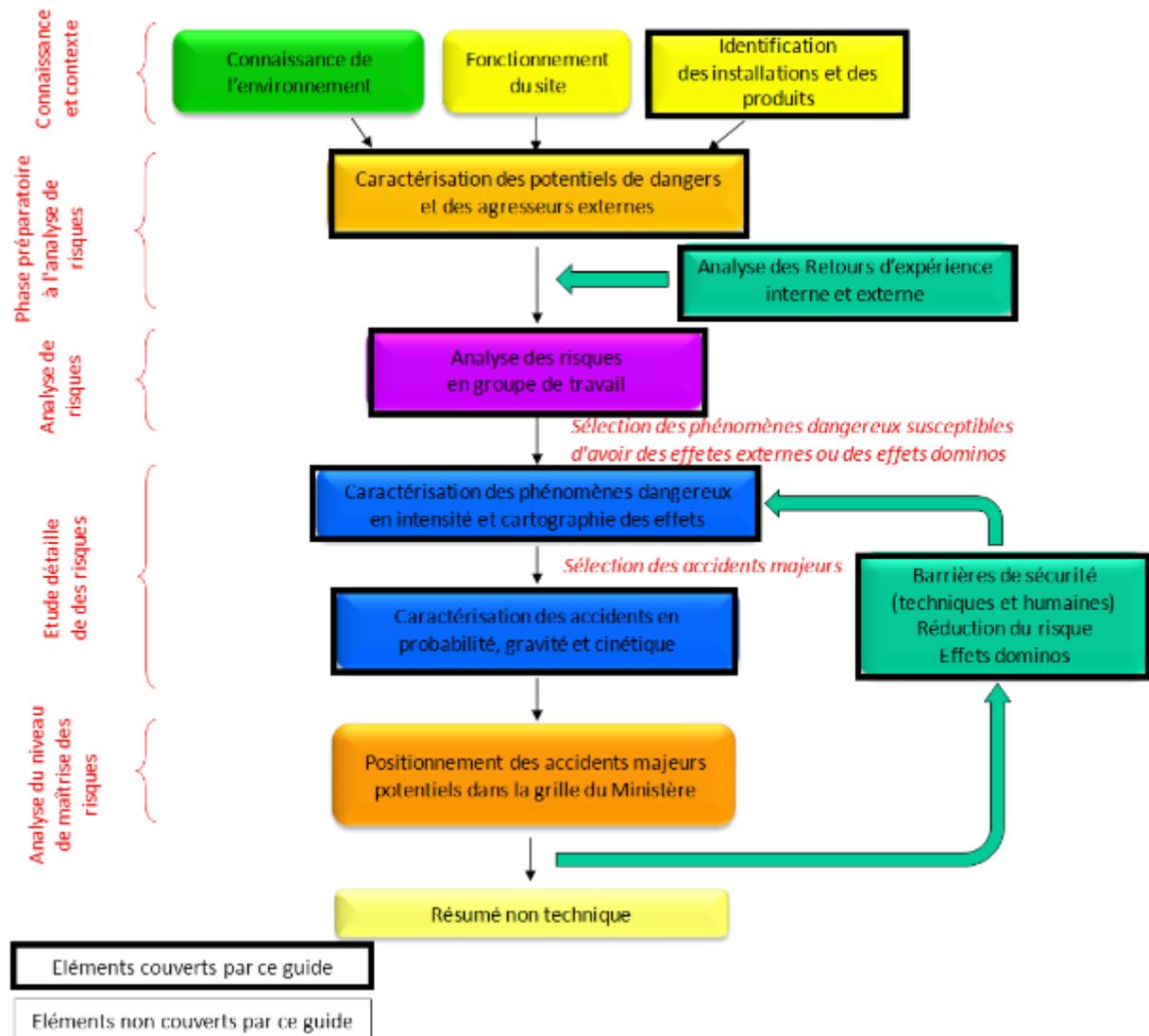


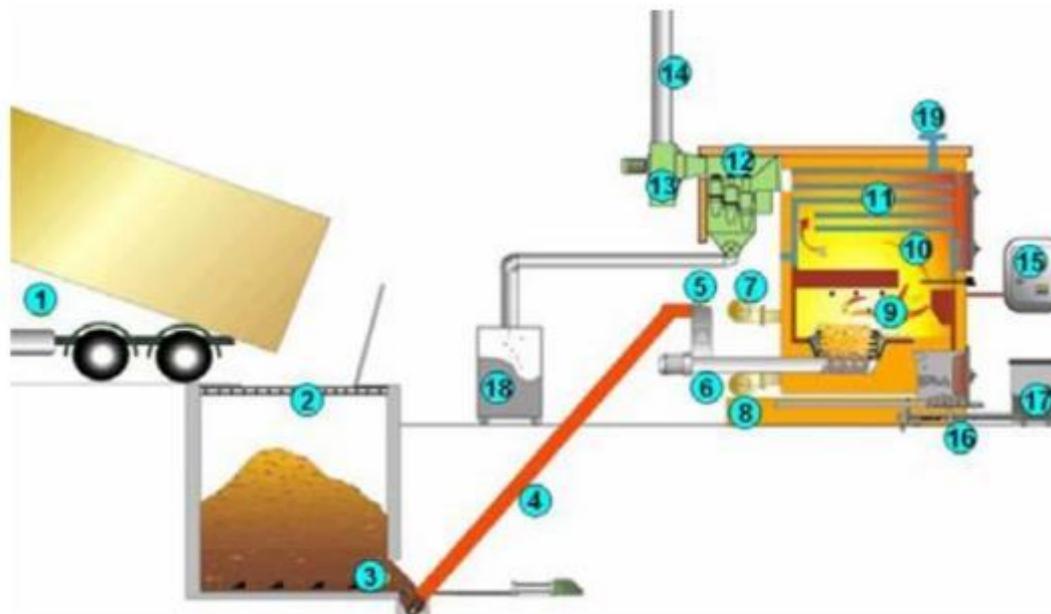
Figure 1 : Logigramme représentant le champ d'utilisation du présent guide

2 DECOUPAGE FONCTIONNEL DES INSTALLATIONS ET IDENTIFICATION DES POTENTIELS DE DANGERS

Ce chapitre a pour objectif de caractériser l'installation envisagée afin de permettre d'identifier les principaux potentiels de danger qu'elle représente, au regard notamment de la sensibilité de l'environnement.

2.1 DESCRIPTION DES INSTALLATIONS ET DECOUPAGE FONCTIONNEL

Un exemple de principe général d'une unité de production de vapeur depuis un combustible solide est donné dans le schéma ci-dessous :



Légende :

- | | |
|--|---|
| 1. Système de livraison | 11. Échangeur |
| 2. Silo d'alimentation | 12. Traitement des fumées |
| 3. Système d'extraction | 13. Extracteur de fumées |
| 4. Système de transfert | 14. Cheminée |
| 5. Système coupe-feu | 15. Armoire de commande et régulation automatique |
| 6. Système de dosage et d'introduction | 16. Decendrage |
| 7. Ventilateur d'air secondaire | 17. Conteneur à cendres |
| 8. Ventilateur d'air primaire | 18. Conteneur à poussières |
| 9. Foyer et chambre de combustion | 19. Départ de la chaleur |
| 10. Chambre de post-combustion | |

Figure 2 : Schéma de principe d'une chaudière biomasse (source : site internet <http://www.ademe.fr> [6] + Guide ADEME [7])

Les principales étapes du fonctionnement d'une chaudière à combustible solide sont les suivantes :

1. La livraison et le stockage de la biomasse :

Les combustibles solides sont généralement acheminés par camion, voire par barges ou wagons, jusqu'au site de la chaudière.

Ils sont ensuite stockés sur place avant d'être envoyés vers la chaudière. Le stockage s'effectue en vrac à l'extérieur ou dans des silos qui peuvent être enterrés, semi-enterrés ou aériens, de plain-pied ou en conteneur.

Dans le cas de la biomasse, la configuration la plus fréquente correspond à des silos aériens. Les silos sont soit des silos verticaux, soit des silos plats et peuvent être en béton ou métallique. La livraison s'effectue sur une aire de déchargement. Le combustible est ensuite transféré via une vis sans fin, un tapis ou un grappin vers le silo de stockage, couplé à une réserve tampon qui alimente la chaudière en combustible.

On désigne par « silo plat »⁵ un silo dont les capacités de stockage ont une hauteur des parois latérales retenant les produits inférieure ou égale à 10 mètres au-dessus du sol. Cette hauteur est mesurée entre le point bas, qu'il soit au-dessous ou au-dessus du niveau du sol, et le point haut des parois latérales retenant les produits.

On désigne par « silo vertical », un silo dont les capacités de stockage ont une hauteur des parois latérales retenant les produits supérieures à 10 mètres au-dessus du sol.⁶

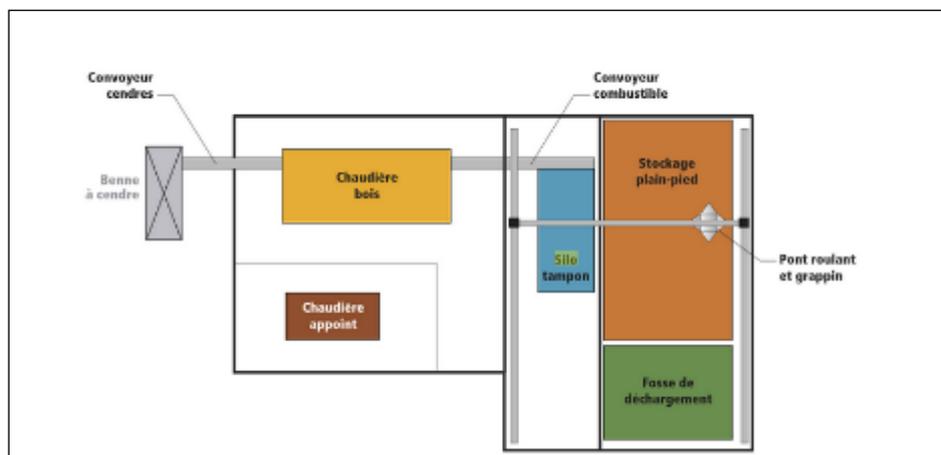


Figure 3 : Configuration de stockage la plus courante d'une chaufferie industrielle à combustible solide (avec grappin et silo tampon entre le stockage et la chaudière)

Dans le cas de silos enterrés de biomasse, la livraison se fait gravitairement par une trappe située en haut du silo qui ferme ce silo. Il est à noter que ces silos ne sont pas pris en compte dans la caractérisation des phénomènes dangereux de ce guide (cf. § 5).

⁵ La terminologie « silo horizontal » peut également être utilisée pour désigner un silo plat.

⁶ Définitions données dans l'arrêté du 29 mars 2004 relatif à la prévention des risques présentés par les silos de céréales, de grains, de produits alimentaires ou de tous autres produits organiques dégageant des poussières inflammables

Dans le cas de matériaux pulvérulents, des silos verticaux sont utilisés et le remplissage peut s'effectuer par des élévateurs à godets ou par des convoyeurs.

En amont et/ou en aval des installations de stockage et selon le type de combustible utilisé et la forme sous laquelle il est livré sur le site, le site peut être muni d'équipements permettant le conditionnement et la préparation de la biomasse et notamment le broyage, le criblage pour éliminer des morceaux grossiers et le dépoussiérage pour éliminer les particules trop fines et le déferrailage pour retirer les éléments métalliques présents dans la biomasse, etc.

Après le stockage, le combustible est extrait du silo, convoyé puis introduit dans la chaudière.

2. Le transfert du combustible vers une trémie d'alimentation de la chaudière :

Les systèmes de désilage permettent l'extraction du combustible vers un système de transfert qui à son tour apportera le combustible jusqu'à la trémie d'alimentation de la chaudière.

Le déstockage des silos s'effectue soit par gravité à partir de trappes de vidange, de moyens de transfert mobiles (chouleurs, grappins), soit par des systèmes d'extraction situés dans le bas des silos tels que l'échelle racleuse, la vis rotative ou des pâles rotatives, soit par des chouleurs. Ainsi, selon la configuration du stockage mis en œuvre (hangar, silos), le transfert de biomasse peut être réalisé par :

- des équipements fixes tels que :
 - Élévateur à godets,
 - Transporteur à chaînes,
 - Transporteur à bandes,
 - Convoyeur à vis,
 - Convoyeur pneumatique.
- des équipements mobiles tels que des sauterelles mobiles ou des engins à moteur thermique comme les chouleurs.

Le convoyage du combustible vers la trémie d'alimentation (de quelques m³) de la chaudière peut être réalisé par extraction mécanique avec une vis sans fin, un convoyeur à bandes, un convoyeur à chaînes, ou par aspiration.

3. La chaudière dans laquelle s'effectue la combustion de la biomasse :

La chaudière est équipée d'un système de traitement des fumées et d'un système de récupération des cendres générées par le combustible solide. La récupération se fait par voie sèche ou humide dans des conteneurs solides type bennes ou des big-bags. Des grilles peuvent être présentes en fond de chaudières pour récupérer les cendres.

Ces éléments sont détaillés en annexe A de ce rapport.

Les installations concernées par le présent guide sont les suivantes :

- les équipements de préparation du combustible tels que broyeur, trieur, sélecteur à air, déferrailleur (séparateur magnétique) ;
- les installations de stockage et de transfert liées au combustible solide :
 - la zone de déchargement avec les équipements de désilage,
 - les silos de stockages,
 - les convoyeurs ou élévateurs à godets,
 - les trémies d'alimentation de chaudières,
 - les chaudières à tubes d'eau et à tubes de fumées :
 - Brûleur et chambre de combustion,
 - Ballon d'eau ;
- le décendrage pour lequel plusieurs types d'installations ont été recensées :
 - Convoyeur à chaînes en cas de décendrage par gravité avec récupération des cendres par voie humide,
 - Décendrage mécanique par convoyeur à vis sans fin vers le cendrier (foyer à grilles mobiles),
 - Décendrage par turbulateur rotatif horizontal (pâle rotative raclant le fond du foyer),
 - Décendrage par aspiration (intervention humaine) avec turbine d'aspiration, lance d'aspiration et tuyauterie.

Ces installations peuvent être complétées par des broyeurs.

Les cendres sont ensuite stockées dans des bennes, cendriers ou cases en béton.

Notes :

Pour rappel, sont exclues du champ d'application de ce guide :

- les silos enterrés ;
- les installations de traitement de l'eau alimentaire alimentant la chaudière ;
- les installations de traitement des fumées ;
- le circuit de vapeur d'eau.

2.2 POTENTIELS DE DANGERS LIES AUX SUBSTANCES

2.2.1 DANGERS LIES A LA BIOMASSE

Le danger principal des biomasses servant à alimenter les chaudières est lié à :

- leur caractère combustible ; elles peuvent donc être le siège d'un incendie en cas de présence d'une source d'inflammation, d'un auto-échauffement par réaction d'oxydoréduction, d'un phénomène de fermentation ou d'une auto-inflammation ;
- le caractère explosible de leurs poussières.

Il est à noter que les différentes biomasses utilisées (agro-biomasse, bois déchet, granulés, sciures, plaquettes forestières, etc.) peuvent présenter des potentiels de dangers variables en fonction de la quantité de fines, de la granulométrie, de leur taux d'humidité, la réactivité des poussières, etc.

Le phénomène d'auto-échauffement dépend du degré d'humidité, de la granulométrie, des conditions de transport et de stockage.

Il est rappelé que pour une installation donnée, deux cas d'explosion peuvent être étudiés :

- une explosion dans un volume ou un équipement, explosion dite « primaire » ;
- ou une explosion dans un volume faisant suite à une propagation. On parle d'explosion secondaire lorsque l'explosion primaire qui se propage rencontre un nuage ou un dépôt de poussières, et enflamme ceux-ci, créant ainsi une nouvelle explosion (dite « secondaire »).

Les phénomènes d'auto-échauffement, de fermentation et de formation de nuage de poussières sont présentés ci-après et détaillés en annexe B de ce document.

Il est à noter que :

- certains combustibles (ex. paille de céréales) peuvent contenir des composés tels que du chlore (1% pour la paille de céréales) qui peut conduire à des émissions de chlorure d'hydrogène et favoriser la corrosion chimique en voie humide ;
- certains combustibles contiennent des substances pouvant générer des émissions toxiques lors d'un départ de feu. Il est précisé que, même si cela ne génère pas d'accident majeur, les risques liés à l'accumulation de gaz asphyxiants dans le ciel du silo lors d'un feu couvant sont à considérer pour l'intervention.

2.2.2 DANGERS LIES AU FIOUL ET AU GAZ

Le gaz naturel et le fioul peuvent être utilisés lors des phases de démarrage des chaudières.

2.2.2.1 DANGERS LIES AU GAZ NATUREL

Le gaz naturel est une énergie fossile contribuant à la production de 21,3% de l'énergie primaire en 2012⁷. Il est issu de la transformation naturelle, pendant des millions d'années, de matières organiques enfouies dans le sous-sol.

Il est composé à 95% de méthane (CH₄), à moins de 4% d'éthane et d'azote, ainsi qu'à 1% de dioxyde de carbone et de propane.

Le gaz naturel est plus léger que l'air. C'est un gaz stable qui n'est ni corrosif ni toxique. Le Règlement CLP classe notamment le méthane comme gaz extrêmement inflammable.

En cas de perte de confinement de gaz naturel, les phénomènes dangereux redoutés sont le feu torche, le VCE (Vapour Cloud Explosion, c'est-à-dire l'explosion de la chaufferie) et l'UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion).

⁷ Données du Key World Energy Statistics 2014 de l'Agence Internationale de l'Energie

2.2.2.2 DANGERS LIÉS AU FIOUL

Le fioul oil domestique (FOD) possède des caractéristiques assez proches de celles du gazole. Il est principalement utilisé comme combustible pour le chauffage. Le FOD est notamment classé liquide inflammable de catégorie 3 (point éclair⁸ -PE- compris entre 55 et 60°C) et toxique chronique catégorie 2 pour les organismes aquatiques selon le Règlement CLP.

Une perte de confinement de FOD peut conduire à un feu de nappe qui, s'il enveloppe le bac de stockage, peut mener à une pressurisation lente de bac. De plus, la présence d'une ATEX (atmosphère explosive) dans le ciel gazeux du bac peut conduire à une explosion du ciel gazeux du bac, à la suite de laquelle un feu de bac et un boil-over en couche mince peuvent se produire.

Le fioul lourd (FL) est un combustible principalement utilisé dans l'industrie (verreries, papeteries, etc.) et les centrales thermiques pour la production d'électricité et de chauffage. En France, depuis le 1^{er} janvier 2003, seuls les fiouls lourds à très basse teneur en soufre (inférieure ou égale à 1%) sont autorisés à l'utilisation en l'état. Le FL n'est pas un liquide inflammable au sens du Règlement CLP (point éclair supérieur à 60°C). Il est en revanche notamment classé toxique aigu et chronique catégorie 1 pour les organismes aquatiques.

De la même manière que dans le cas du FOD, une pressurisation lente de bac est envisageable. De plus, lorsque le FL est utilisé comme combustible dans les chaudières, il est chauffé dans le bac aux alentours de 50°C pour faciliter son pompage et son acheminement vers la chaudière. Un défaut de régulation du chauffage du fioul pourrait entraîner une surchauffe de ce dernier au-delà de son point éclair et une explosion du ciel gazeux du bac, à la suite de laquelle un feu de bac et un boil-over classique peuvent se produire.

Notes :

Etant donné la faible volatilité du fioul (FOD ou FL), une perte de confinement de fioul ne conduira pas à l'occurrence d'un UVCE. Par ailleurs, les vapeurs de FL chauffé se refroidiront rapidement.

De plus, un rejet massif d'un mélange gazeux en surpression par l'évent de la citerne de dépotage ou du bac ne conduira pas à un phénomène dangereux à l'origine d'un potentiel accident majeur (UVCE non retenu de par le refroidissement rapide des vapeurs et feu torche exclu de par les conditions de rejet).

Plus de précisions sur les risques liés au fioul (FOD ou FL) sont apportées dans les Fiches de Données Sécurité (FDS) auxquelles l'exploitant est invité à se reporter.

⁸ Le point éclair (PE) d'un liquide est la température minimale pour laquelle la concentration des vapeurs émises est suffisante pour produire une déflagration au contact d'une flamme ou d'un point chaud dans les conditions normalisées, mais insuffisante pour produire la propagation de la combustion en l'absence de la flamme "pilote" (<http://www.pointclair.com/spip.php?article1>)

2.3 POTENTIELS DE DANGERS LIES AUX EQUIPEMENTS ET AUX PROCÉDES

L'identification des dangers liés aux équipements et au procédé tient compte :

- des différentes catégories de dangers présentés par les substances présentes et décrits au chapitre précédent ;
- des différents équipements et de leurs dangers associés (présence de flamme, eau sous pression, etc.) ;
- des conditions opératoires d'utilisation et de mise en œuvre ;
- des conditions de fonctionnement.

Il est réalisé sur la base du retour d'expérience et doit être réalisé sur chaque site en préalable aux analyses de risques afin de prendre en compte des spécificités propres aux installations étudiées. Ces dangers sont détaillés dans les paragraphes suivants pour chaque équipement relatif au fonctionnement d'une chaufferie à biomasse.

2.3.1 DANGERS LIES AU STOCKAGE, A LA MANUTENTION ET A L'UTILISATION DE BIOMASSE

Les dangers associés aux installations de stockage, de préparation, de manutention de la biomasse sont :

- l'incendie soit par combustion des matières en présence d'une source d'inflammation, soit par auto échauffement de la biomasse, soit par fermentation aérobie (cf. annexe B) ;
- l'explosion de poussières de biomasse suite à la formation d'un nuage de poussières, en cas de présence d'une source d'inflammation (travaux par points chauds, présence d'une charge électrostatique, courants vagabonds, échauffement mécanique notamment en cas de patinage des bandes ou des courroies ou en cas de frottement de pièces mécaniques en mouvement (grippage de paliers, ...), biomasse incandescente dans la biomasse issue du stockage, etc.) ;
- dans le cas des silos :
 - l'explosion de gaz de pyrolyse en cas de formation d'un nuage constitué d'un mélange d'air et de gaz (CO, CH₄...) pouvant résulter de la combustion incomplète du combustible après auto-échauffement de la biomasse (par exemple, en cas de température du produit dépassant la température critique, d'augmentation de la durée de stockage suite à des travaux ou arrêt imprévu suite à une panne),
 - l'ensevelissement, en cas d'effondrement des parois du stockage.

Les risque d'explosion de poussières en cas de présence d'une source d'inflammation et d'incendie (feu couvant) se retrouvent au niveau des espaces bâtimentaires et des systèmes d'aspiration et de dépoussiérage.

Dans le cas de stockages extérieurs non confinés, le scénario d'explosion ne serait pas à retenir.

Ces dangers sont détaillés équipement par équipement en annexe A.

2.3.2 DANGERS LIES A LA CHAUDIERE A COMBUSTIBLE BIOMASSE

2.3.2.1 TREMIE D'ALIMENTATION DE LA CHAUDIERE

Le combustible est amené dans la chaudière via un système de convoyage qui alimente la trémie d'alimentation de la chaudière (volume de la trémie de quelques m³) : le combustible n'est pas stocké dans cette trémie car cette trémie a des cycles de vidange de l'ordre de l'ordre de la minute à quelques dizaines de minutes.

Même si ce n'est qu'un lieu de transfert de combustibles et que le temps de stockage est faible, les dangers qui pourraient être associés à la trémie d'alimentation sont les suivants :

- le risque d'incendie dans la trémie⁹ ;
- l'explosion d'un nuage de poussières de biomasse ou l'explosion de CO, en cas de présence d'une source d'inflammation (notamment défaut d'étanchéité du système engendrant une remontée de gaz de combustion depuis la chaudière ou un retour de flamme depuis la chaudière vers la partie inférieure de la trémie d'alimentation).

2.3.2.2 DANGERS LIES A LA CHAUDIERE

Les risques principaux sont l'explosion au niveau de la chambre de combustion et l'éclatement de capacité d'eau.

L'explosion au niveau de la chambre de combustion peut faire suite à :

- une accumulation de gaz de combustion (et en particulier formation d'une poche de CO) lors de la combustion de la biomasse ;
- mais également, dans le cas d'un allumage au gaz naturel, à une accumulation de gaz naturel dans la chambre, en particulier lors de la phase d'allumage. En effet, le gaz naturel est utilisé pour le démarrage de la flamme et peut être également utilisé en appoint si nécessaire.

L'incendie de chaudière est un événement possible. Il n'est pas étudié dans ce guide car ses effets restent généralement limités au site.

Certaines chaudières disposent de grilles tournantes sur lesquelles le combustible est projeté ou de dispositifs de pulvérisation. Ces éléments peuvent générer un nuage anormal de poussières en cas de dysfonctionnement ou en cas de défaillance de l'approvisionnement en combustibles, conduisant à la formation d'un nuage de poussières et à une explosion de poussières. Certaines configurations de fonctionnement de la chaudière pourraient également conduire à la formation d'un nuage de poussières. Les conditions particulières d'occurrence de ce scénario d'explosion de poussières dans la chaudière sont à préciser. Ce scénario est couvert par l'explosion de la chambre de combustion.

⁹ Le retour d'expérience de la base ARIA du BARPI montre l'existence d'au moins un incendie (accident n°47366) et une explosion (accident n°35499) dans une trémie d'alimentation de chaudière biomasse bois.

L'éclatement ou BLEVE de la capacité d'eau se produit en cas d'augmentation de la pression dans la capacité d'eau, soit lentement si celle-ci est chauffée par un incendie, soit brutalement en cas de vaporisation brutale de l'eau lors d'une remise en eau de tubes surchauffés. Ce phénomène n'est pas recensé dans l'accidentologie des chaudières biomasse, mais il est cependant physiquement possible et donc retenu dans la suite de ce guide. Il est considéré que tous les scénarios conduisant à une surpression brutale dans la chaudière sont couverts par le BLEVE.

2.3.2.3 DANGERS LIES AUX INSTALLATIONS DE DECENDRAGE

Le danger principal est l'incendie en cas d'autocombustion des imbrulés ou en cas de présence de particules incandescentes, dans l'ensemble de l'installation de décentrage y compris le stockage des cendres (pouvoir résiduel d'oxyréactivité selon les conditions de tirage de la chaudière).

2.3.3 SYNTHÈSE DES POTENTIELS DE DANGERS LIES AUX EQUIPEMENTS ET AUX PROCÉDES

Le tableau ci-après synthétise les dangers liés aux procédés et aux équipements identifiés précédemment.

Equipements	Phénomènes dangereux redoutés
Stockage en silo (plat ou vertical)	Incendie Explosion de CO Explosion de poussières Ensevelissement
Stockage ouvert	Incendie
Installations de préparation du combustibles (tamis, trieur, broyeur, etc.)	Incendie Explosion de poussières
Convoyage/Installations de transfert	Incendie Explosion de poussières
Espace bâtiminaire	Explosion de poussières
Système d'aspiration et de dépoussiérage	Incendie Explosion de poussières
Trémie d'alimentation	Incendie Explosion de CO Explosion de poussières
Chaudière - Chambre de combustion	Explosion de la chambre de combustion (VCE) en cas d'accumulation de gaz (au démarrage uniquement), en cas d'accumulation de CO ou en cas de formation anormale d'un nuage de poussières
Chaudière - Capacités d'eau surchauffée	BLEVE de la capacité d'eau (pressurisation lente)
Gestion des cendres	Incendie (oxydabilité résiduelle de cendres)

Tableau 2 : Dangers liés aux équipements et aux procédés

Certaines installations telles que celles liées à la préparation du combustible, au convoyage, au dépoussiérage ou à l'alimentation de chaudière ne sont généralement concernées que par de petits volumes de matières combustibles. Ainsi, ces installations sont considérées, dans le cadre de ce guide, comme ne conduisant pas à des accidents majeurs dans certaines configurations.

Toutefois, elles devront être évoquées dans l'étude de dangers d'un site et en particulier dans l'analyse de risques ; de plus, une attention particulière devra être portée pour justifier, après l'analyse de risques, que ces scénarios ne conduisent pas à des accidents majeurs (notamment au regard de leurs dimensions).

Enfin, les scénarios de ces installations devront être considérés comme évènements initiateurs d'un phénomène dangereux (incendie ou explosion) sur d'autres installations conduisant à des accidents majeurs (et notamment le stockage) quand cela est pertinent.

Au regard de ces éléments, seuls les accidents majeurs des installations liées à une chaufferie à biomasse ayant les intensités potentiellement les plus importantes sont retenus et étudiés dans la suite de ce guide ; ils sont listés dans le tableau ci-après (ils pourront être complétés d'autres accidents majeurs au regard des particularités de chaque installation).

Equipements	Phénomènes dangereux redoutés
Stockage en silo	Incendie Explosion de CO Explosion de poussières Ensevelissement
Espace bâtementaire	Explosion de poussières
Chaudière - Chambre de combustion	Explosion de la chambre de combustion (VCE) en cas d'accumulation de gaz (au démarrage uniquement) ou en cas d'accumulation de CO
Chaudière - Capacités d'eau surchauffée	BLEVE de la capacité d'eau (pressurisation lente)

Tableau 3 : Dangers comme pouvant conduire à un accident majeur retenus dans le cadre de ce guide

Ces scénarios sont détaillés au § 4.2.

Il est précisé que :

- l'étude de dangers, comme cela est fait dans toutes les installations, devra évoquer les éventuelles incompatibilités de substances ainsi que les risques liés aux utilités ;
- le démarrage des chaudières à combustible solide se fait soit manuellement (inflammation de tas de combustibles) soit avec du gaz naturel ou du fuel. Les tuyauteries d'alimentation de la chaudière en gaz ou fuel doivent être intégrées à l'étude de dangers, ainsi que les risques liés à l'utilisation du gaz ou du fuel dans la chaudière au démarrage. Les scénarios ne sont pas détaillés dans le cadre de ce guide mais figurent dans le guide pour la prise en compte des chaudières industrielles dans la rédaction d'une étude de dangers [1]. Ces scénarios devraient être intégrés dans l'étude de dangers d'une chaufferie à combustible solide. A noter que les pertes de confinement de vapeur du circuit de vapeur haute pression en aval de la chaudière sont à prendre en compte lors

de l'identification des événements initiateurs à l'origine d'une perte de confinement sur les tuyauteries de combustible présentes à proximité ou sur toute autre installation contenant des substances dangereuses ;

- dans certaines chaudières, un procédé de cogénération est utilisé. Dans ce cas, les risques liés aux installations complémentaires de production d'électricité mais aussi, si pertinent, aux installations de traitement de gaz et aux installations contenant de la vapeur devront être intégrés à l'analyse de risques de l'étude de dangers. Ces installations et leurs risques ne sont pas détaillés dans le cadre de ce guide.

2.4 REDUCTION DES POTENTIELS DE DANGERS

Les stratégies de réduction des potentiels de dangers dépendent du contexte dans lequel s'inscrit le site étudié (installations existantes ou nouvelles, environnement avec plus ou moins d'enjeux, etc.).

Les stratégies citées dans ce paragraphe n'ont pas vocation à être exhaustives, elles sont à considérer comme des exemples.

Ce paragraphe ne concerne pas les barrières de sécurité qui sont traitées au § 4.3, mais les choix de conception et les pratiques qui permettent de réduire le risque à la source.

Il est rappelé que :

- Pour les silos de bois relevant de la rubrique 1532 et soumis à autorisation¹⁰, il n'y a pas d'arrêté spécifique mais il est préconisé d'appliquer, comme pour les silos de stockage d'autres biomasses relevant de la rubrique n°2160 et soumis à autorisation, les dispositions des articles 9 et 10 de l'arrêté du 29 mars 2004¹¹. Ces dispositions sont détaillées dans le guide de l'état de l'art sur les silos [4] ;
- pour les installations de préparation de combustible relevant de la rubrique n°2260, les dispositions de l'arrêté du 18 février 2010¹² sont applicables. En particulier, des dispositifs de désenfumage, une résistance au feu des parois et des dispositifs d'évacuation de la surpression doivent permettre de réduire les risques d'incendie et d'explosion de ces équipements.

2.4.1 REDUCTION DE L'EMPOUSSIEREMENT

¹⁰ Il existe cependant des arrêtés spécifiques pour les silos de bois soumis au régime de la déclaration ou de l'enregistrement. Ainsi, les silos de bois, relevant de la rubrique 1532 soumis à enregistrement, relèvent de l'arrêté du 11 septembre 2013 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations relevant du régime de l'enregistrement au titre de la rubrique n° 1532 et ceux soumis à déclaration de l'arrêté du 5 décembre 2016 relatif aux prescriptions générales applicables à certaines installations classées soumises à déclaration (rubrique 1532.3).

¹¹ Arrêté du 29 mars 2004 relatif à la prévention des risques présentés par les silos de céréales, de grains, de produits alimentaires ou de tous autres produits organiques dégageant des poussières inflammables

¹² Arrêté du 18 février 2010 relatif à la prévention des risques accidentels présentés par certaines installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation sous la rubrique n° 2260

La réduction de la quantité de poussières présentes dans les locaux passe par des mesures visant à éviter leur dépôt ainsi que leurs dégagements hors des appareils où leur présence ne peut être évitée en raison de la nature de l'opération effectuée.

- Lutte contre les émissions de poussières :
 - Capotage des équipements,
 - Captage des poussières à la source par aspiration avec un réseau de dépoussiérage avec :
 - Vitesse de circulation de l'air dans les tuyauteries du circuit de dépoussiérage suffisante pour éviter les dépôts de poussières dans les tuyauteries,
 - Double asservissement du fonctionnement de certains équipements (démarrage uniquement si l'aspiration fonctionne et arrêt de l'équipement en cas d'arrêt de l'aspiration) et en particulier de tous les transporteurs à cette aspiration.
 - Hauteur de chute limitée depuis les transporteurs/convoyeurs,
 - Système de brumisation des poussières,
 - Maintenance curative pour réparer les fuites des équipements.
- Lutte contre les dépôts de poussières par nettoyage :

Nettoyage des poussières dans les espaces bâtimentaires par aspiration : en effet, les systèmes de dépoussiérage ne peuvent être efficaces à 100% et il est indispensable de procéder régulièrement à un nettoyage des locaux pour éviter des dépôts de poussières importants. Le nettoyage est manuel avec des installations centralisées ou mobiles de nettoyage. L'usage de balai ou de soufflette à air comprimé est proscrit ou encadré par une procédure. Les nettoyages font l'objet d'un relevé. Pour adapter la fréquence de nettoyage, il est possible d'utiliser des croix de couleur au sol qui témoignent du besoin de nettoyage dès qu'elles sont couvertes de dépôts de poussières.

Les prescriptions techniques relatives notamment à la ventilation, au désenfumage, à l'aspiration des poussières indiquées dans l'arrêté du 29 mars 2004 pour la rubrique 2160 sont présentées en annexe F. L'application de ces prescriptions est également préconisée pour les silos de bois relevant de la rubrique 1532.

2.4.2 REDUCTION DES SOURCES D'INFLAMMATION

Outre les dispositions d'interdiction de fumer et les procédures de permis de feu, les sources d'inflammation sont limitées par les dispositions suivantes :

Corps étrangers

Le choc de corps étrangers, la friction ou le frottement peuvent générer des étincelles ou des échauffements d'origine mécanique propres à provoquer une inflammation d'un nuage de poussières.

Les équipements peuvent être équipés d'un séparateur magnétique ou de grille au niveau des fosses de réception des produits.

Frottements

Les risques d'inflammation par frottements mécaniques concernent presque tous les équipements comportant des pièces en mouvement.

Outre la vérification et l'entretien périodiques des organes de transmission, des paliers, etc., les équipements peuvent être équipés de bandes ou des sangles non propagatrices de chaleur, ce qui limite le risque de propagation d'un incendie. Cette mesure de conception est imposée par certains arrêtés (arrêté du 18 février 2010, arrêtés pour les silos relevant de la rubrique 2160).

Électricité statique

La continuité électrique de l'installation doit être assurée (mise à la terre et équipotentialité).

Les bandes des convoyeurs sont antistatiques.

Les filtres peuvent être munis de manche antistatique.

Électricité

Les matériels électriques et non électriques de type IP5X avec une température de fonctionnement conditionné doivent être utilisés dans le silos conformément à la réglementation et aux normes en vigueur.

Remontée de flamme

Des dispositifs anti-remontée de flamme peuvent être mis en place (Clapet coupe-feu en sortie convoyeur, séparation physique entre le foyer et la trémie d'alimentation du silo, écluse rotative étanche à la flamme et à l'explosion en partie inférieure de la trémie d'alimentation du foyer de la chaudière par exemple).

2.4.3 REDUCTION DE LA FERMENTATION OU DE L'AUTO-ECHAUFFEMENT DU COMBUSTIBLE

La fermentation aérobie ou l'auto-échauffement par oxydoréduction du combustible est favorisée par :

- Une humidité importante ou température importante du produit livré ;
- La pénétration d'eau dans le produit stocké ;
- Un temps de séjour long.

Ces paramètres doivent donc être maîtrisés en éliminant les possibles sources d'introduction d'eau dans le produit et en limitant les temps de stockage notamment en cas d'interruption d'exploitation.

L'arrêté de la rubrique 2160 de la nomenclature des ICPE relative aux silos et installations de stockage de combustibles dégageant des poussières inflammables spécifient des prescriptions techniques relatives notamment à la qualité des combustibles entrant dans le stockage (cf. annexe F).

Il est précisé que le guide de l'état de l'art sur les silos fournit, au paragraphe 2.12 de ce guide, un logigramme pour étudier les phénomènes d'auto-échauffement.

Pour réduire et prévenir ce risque, comme indiqué dans le rapport "Health and Safety Aspects of Solid Biomass Storage, Transportation and Feeding" d'avril 2013 réalisé pour IEA Bioenergy, il est conseillé de :

- Éviter de mélanger différents types de biomasse ;
- Limiter la hauteur des stockages en cas de stockage en vrac (des hauteurs maximales de stockage sont fournies dans ce rapport) ;
- Limiter les différences d'humidité au sein d'un même stockage.

D'autre part, si un échauffement se produit dans un silo, l'exploitant à la possibilité de vidanger le silo ou de l'inerté, suivant des procédures permettant d'éviter des risques d'incendie ou d'explosion.

2.4.4 REDUCTION DES RISQUES DE PROPAGATION D'UNE EXPLOSION

Afin de prévenir la propagation d'une explosion d'un espace bâtementaire vers un autre, le découplage est utilisé afin d'isoler l'explosion des autres installations, avec des systèmes de vannes ou d'écluses, en séparant les espaces bâtementaires par des murs ou par des système actifs (découplage chimique).

Comme indiqué dans le guide de l'état de l'art sur les silos, la présence (ou l'absence) de communications entre différents volumes et la présence (ou l'absence) d'événements ou de surfaces soufflables dans ces volumes doivent donc faire l'objet d'un examen attentif lors de l'élaboration et de l'examen d'une étude de dangers.

Afin de prévenir la propagation d'un incendie, les bonnes pratiques consistent à désenfumer, afin d'évacuer la chaleur et à compartimenter les volumes par la séparation des espaces ou la mise en place de parois coupe-feu.

Il faut également limiter les galeries de manutention et, de manière plus générale, éviter les volumes confinés (galerie enterrée, fosse, etc.).

2.4.5 REDUCTION DES RISQUES D'EXPLOSION AU NIVEAU DE LA CHAUDIERE

La diminution des volumes de la chambre de combustion, du ballon d'eau ou de la calandre de la chaudière peut représenter une solution de réduction du risque à la source. Toutefois, la diminution de la taille des équipements restera limitée par des contraintes techniques, de rendement et de performances à atteindre par l'installation.

3 ANALYSE DU RETOUR D'EXPERIENCE

Ce chapitre présente une synthèse de l'accidentologie des chaudières industrielles à biomasse et de leurs installations connexes : préparation du combustible, stockage, dépoussiérage, gestion des cendres ; cette synthèse alimente l'analyse des risques.

Cette étude de l'accidentologie est basée sur des recherches de la base ARIA du BARPI sur des événements concernant des chaudières à biomasse qui ont été complétées par des recherches sur les installations connexes à la chaudière elle-même. Cette étude est présentée en annexe C de ce guide.

Les paragraphes suivants présentent les éléments principaux de cette synthèse.

Pour rappel, les installations de traitement de fumées de la chaudière (filtre, cyclofiltre, filtre à manches, etc.) ne sont pas traitées dans ce guide.

3.1 GENERALITES

33 requêtes ont été effectués sur la base ARIA du BARPI sur les broyeurs, tamis, trieurs, silos, chaudières, cendres et équipements de transfert (convoyeurs à bandes transporteurs à chaînes, transporteurs à vis et élévateurs à godets) et en considérant de la biomasse ou plus spécifiquement du bois.

Ces recherches ont permis d'identifier 885 accidents parmi lesquels, après recherche des doublons et évaluation de la pertinence des accidents listés, 409 accidents ont été jugés pertinents, la période couverte allant d'octobre 1982 pour le plus ancien accident jusque février 2018.

Les installations majoritairement concernées sont les silos (environ 60%). En revanche, les accidents relatifs à la chaudière en elle-même sont très peu nombreux.

La biomasse de type bois (sciures, poussières, copeaux, écorces, granulés) est la plus représentée dans cette accidentologie ; ce qui s'explique notamment par le fait qu'elle correspond également au type de biomasse le plus utilisé.

Les incendies correspondent au phénomène dangereux le plus représenté pour l'ensemble des équipements (79%) ; les phénomènes d'explosion suivie d'un incendie représentent 17% des accidents.

D'après le classement par typologie des conséquences, aucun de ces accidents n'a occasionné d'effets sur des personnes à l'extérieur du site.

3.2 RETOUR D'EXPERIENCE SPECIFIQUE AUX CHAUDIERES

Parmi les accidents recensés, 21 accidents concernent des chaudières à biomasse, dont 2 sont des explosions, 3 des explosions accompagnées d'incendies, 15 des incendies et 1 correspond à un échauffement de la chaudière uniquement. Il est à noter que les phénomènes dangereux exacts et la localisation des incendies ne sont pas bien décrits dans l'accidentologie (ex. incendie de chaudière, incendie du local chaudière, etc.). Parmi les accidents recensés, aucun n'a eu d'effets sur des personnes en dehors des limites de propriété.

Les causes de ces phénomènes dangereux notables sont :

- Pour les incendies :
 - Un retour de flamme de la chaudière vers son alimentation,
 - La projection de braises à travers une grille dans le calorifuge de la chaudière,
 - La surchauffe de la chaudière,
 - Un mauvais mélange de biomasse dans la chaudière entre plusieurs types de biomasse de caractéristiques différentes,
- Pour les explosions :
 - La présence d'eau dans le circuit primaire du fluide caloporteur de la chaudière (huile) conduisant à une vaporisation d'huile depuis la cuve de purge, puis l'explosion du brouillard d'huile ainsi formé,
 - L'accumulation de gaz dans le foyer dû à un mauvais tirage.

Ce retour d'expérience peut être complété de certains éléments du retour d'expérience propre aux chaudières à vapeur présenté dans le guide pour la prise en compte des chaudières industrielles dans la rédaction d'une étude de dangers [1]. En particulier, le fluide caloporteur (eau) a été impliqué dans plusieurs cas d'explosion, d'incendie ou de ruine à l'intérieur de chaudières à gaz et pourrait également l'être dans les chaudières à combustible. Le mécanisme en jeu est généralement la vaporisation brutale du fluide surchauffé suite à une perte de confinement accidentelle pouvant être causées par :

- La présence d'eau dans le corps de chauffe ;
- Le manque d'eau dans le corps de la chaudière (tubes de fumées) associé à une défaillance des éléments de contrôle de niveau ;
- La pollution (par exemple la contamination des fluides par les hydrocarbures lors de leur utilisation) ou la dégradation du fluide après de nombreux cycles, qui en modifient les propriétés physiques et peuvent conduire à des effets indirects.

De plus, la défaillance des équipements annexes tels que les pompes de pressurisation du circuit de circulation du fluide caloporteur ou de contrôle de niveau peuvent donner lieu à l'échauffement d'éléments métalliques et à des éclatements ou des départs d'incendie.

3.3 RETOUR D'EXPERIENCE SPECIFIQUE AUX AUTRES INSTALLATIONS

3.3.1 REX SPECIFIQUE AUX EQUIPEMENTS DE PREPARATION DU COMBUSTIBLE

Les équipements traités dans ce REX permettant le tamisage, le broyage, le tri des éléments de combustibles sont les broyeurs, les trieurs, les tamis et les séchoirs.

54 accidents concernent les installations de préparation de combustible, correspondant à 34 incendies, 20 explosions dont 19 suivies d'un incendie.

Les broyeurs sont particulièrement concernés (22 accidents sur 54, soit plus de 40%).

Les principales causes sont :

- Les travaux par points chauds ;
- Un bourrage de matière à l'intérieur d'un équipement ;

- L'encrassement et le mauvais nettoyage ;
- L'échauffement mécanique d'un élément (présence de corps étranger, de pièces métalliques) ou du combustible par frottement.

3.3.2 REX SPECIFIQUE AU STOCKAGE DU COMBUSTIBLE

281 accidents concernant des silos de stockage de bois ont été recensés, parmi lesquels 57 explosions dont 53 suivies d'un incendie et 224 incendies. Il est à noter que ce REX intègre tous les stockages de bois « divisé » quel que soit le secteur d'activité y compris les stockages de copeaux de bois ou de sciure utilisés dans des usines de fabrication de panneaux de bois ou des menuiseries par exemple. Ainsi, il est nécessaire de tenir compte des caractéristiques spécifiques de ces poussières de bois qui peuvent être très différentes de celles de la biomasse utilisée dans des chaudières.

Les causes d'incendie et d'explosion mises en évidence par l'accidentologie sont :

- La fermentation, le stockage de combustibles avec une température trop élevée ;
- Les travaux par point chaud ;
- La remontée de flamme de la chaudière ;
- La remontée d'air chaud de la chaudière ;
- Une étincelle d'origine électrique ;
- La propagation d'incendie d'autres équipements vers le silo ;
- Une étincelle provenant d'autres équipements et transférée vers le silo.

Dans ces deux derniers cas, la source d'inflammation peut provenir de l'échauffement mécanique par frottements au niveau des équipements de transfert ou de préparation ou de dépoussiérage, le frottement de pièces métalliques, la présence de corps étranger, le frottement au niveau du mécanisme d'extraction en bas de silo, le frottement du combustible en cas de bourrage.

Ainsi, il est à noter que 38 accidents sur les silos concernent les silos mais également d'autres équipements (transfert, préparation, chaudière).

Un flash information concernant les risques d'incendie et d'explosion dans les silos à bois a été publié par le BARPI en 2015 [8]. Il met en évidence les risques d'incendie et d'explosion, et les conséquences qui peuvent être des projections d'éclats, des écroulements de structure, une onde de souffle. Il est présenté en annexe C.

3.4 REX SPECIFIQUE AUX EQUIPEMENTS DE TRANSFERT DU COMBUSTIBLE

L'accidentologie met en évidence 40 accidents sur les équipements de transfert, parmi lesquels 33 incendies, 7 explosions dont 5 suivies d'un incendie.

Les convoyeurs à bande sont les plus représentés.

Les causes mises en évidence par l'accidentologie :

- Le colmatage/le bourrage ;
- Les travaux par point chaud ;
- Le retour de particules incandescentes provenant de la chaudière (1 accident) ;
- L'étincelle d'origine électrique ;
- L'échauffement d'un élément, en particulier en cas de frottement avec une pièce métallique ;
- L'échauffement mécanique généré en cas de rupture d'un élément (pallier ou roulement) ou en cas de défaillance d'un élément (blocage, décrochage d'un godet, mauvais positionnement d'une bande/chaine, etc.) ;
- La défaillance du moteur d'entraînement.

3.4.1 REX SPECIFIQUE A LA GESTION DES CENDRES

3 accidents concernent le stockage des cendres.

L'un conduit à l'envol de cendres (sans phénomène dangereux). Les deux autres sont des incendies, dus, pour l'un, au non-respect de la consigne d'arrosage prévue pour refroidir les cendres, pour l'autre, à la présence de cendre incandescente dans le big-bag de décentrage.

3.4.2 REX SPECIFIQUE AU DEPOUSSIERAGE

13 accidents recensés concernent des installations de dépoussiérage. 9 accidents recensés concernent des installations de dépoussiérage et se propagent aux silos. Soit un total de 22 accidents.

18 d'entre eux sont des incendies et 4 sont des explosions avec des incendies.

Les causes fournies pour 13 d'entre eux sont les suivantes :

- L'aspiration de poussières ou particules incandescentes, en cas de travaux par points chauds, ;
- L'échauffement mécanique, se produisant notamment dans les équipements aspirés (installations de transfert, broyeurs, etc.) ;
- L'auto-échauffement de poussières dans le système de filtration ;
- Un changement dans la granulométrie très fine du combustible augmentant l'empoussièrément.

4 ANALYSE DE RISQUES ET SCENARIOS D'ACCIDENT

4.1 INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est de guider le lecteur dans la conduite de sa propre analyse de risques dans le cadre de la réalisation de son EDD. Les phénomènes pouvant avoir des distances d'effets hors du site ou bien conduire à des effets dominos sur les autres installations du site peuvent être facilement identifiés et intégrés à l'EDD globale du site étudié. Néanmoins, l'applicabilité et l'exhaustivité des scénarios présentés ci-après sont à vérifier.

Afin de faciliter l'utilisation de ce guide, l'analyse de risques réalisée est plus concise que si elle était menée dans le cadre d'une EDD. Elle a pour objectif principal d'identifier les scénarios aux conséquences potentiellement les plus importantes, considérés ici comme accidents majeurs (c'est-à-dire les scénarios dont les effets sortent potentiellement des limites du site) ainsi que les barrières de sécurité qui empêchent ces scénarios de se produire ou en limitent les effets, pour les silos de stockage, les espaces bâtimentaires et les chaudières.

Un tableau générique d'analyse de risque est présenté en annexe D au vu des éléments présentés dans le chapitre 2 et notamment dans le Tableau 3. Ce tableau vise à identifier les événements pouvant affecter ces installations mais également les installations de préparation et de transfert. **Ce tableau n'a pas vocation à être exhaustif. Il constitue une base de travail pour l'analyse de risques d'une chaufferie à biomasse ; il devra être adapté à chaque site, pour y intégrer les installations du site étudié et pour s'assurer qu'au regard des dispositions particulières du site et notamment de la position géographique des installations sur le site par rapport aux limites de site, les effets attendus ne sortent pas des limites de propriété et ne conduisent pas à un accident majeur.** En particulier, il est précisé que :

- Les équipements de préparation de combustible et de transport (concasseur, broyeur, tamiseur, etc.) ont une taille peu importante ; de plus, ils sont souvent dans des locaux fermés, on retient donc rarement les scénarios d'incendie ou d'explosion les affectant dans l'EDD. Enfin, si le feu est couvant, il ne donne pas lieu à des flammes ; de ce fait, les effets thermiques ne sont pas importants et à moins que les équipements soient en bordure du site, leurs effets ne dépassent pas les limites de propriété. Toutefois, ces équipements devraient être étudiés dans l'analyse préliminaire de risque de l'EDD d'un site pour vérifier si leurs effets ne sortent pas des limites de site. De plus, ils constituent le plus souvent des événements initiateurs d'autres phénomènes dangereux et notamment d'explosion dans des volumes plus importants et doivent être pris en compte à ce titre.
- Les tuyauteries de gaz qui pourraient alimenter la chaudière à biomasse pour un allumage au gaz devraient être traitées dans l'analyse de risque d'un site.
- Les installations de traitement de fumées de la chaudière à biomasse (filtre, cyclofiltre, filtre à manches, etc.) ne sont pas traitées dans ce guide mais devraient être intégrées à l'APR.
- Le scénario d'explosion de poussières dans la chaudière sera ajouté à l'analyse de risque du site, si certaines configurations de fonctionnement de la chaudière (hors fonctionnement normal) le justifient (cf. § 2.3.2.2).

- Pour les silos, un effondrement du silo dû au vieillissement de la structure peut être envisagé. Cependant, les distances d'ensevelissement étant souvent inférieures aux distances entre les silos et les limites de site, ce scénario n'est pas retenu comme accident majeur. Il devra néanmoins être vérifié selon la configuration du site étudié, en appliquant les principes donnés dans le guide de l'état de l'art sur les silos (distance d'ensevelissement sous le produit).
- Les effets dominos des installations voisines sur celles de la chaufferie doivent être pris en compte comme événement initiateur dans l'analyse de risque et sa probabilité devra être retenue pour le calcul de probabilités des phénomènes dangereux de la chaufferie associés.

Les phénomènes dangereux identifiés lors de cette étape d'analyse de risques, synthétisés au paragraphe suivant, sont ensuite caractérisés en termes d'intensité, de probabilité d'occurrence annuelle et de cinétique (éléments abordés respectivement dans les chapitres 5, 6 et 7).

4.2 ÉVÉNEMENTS REDOUTES CENTRAUX ET PHÉNOMÈNES DANGEREUX ASSOCIÉS RETENUS

Les événements redoutés centraux et phénomènes dangereux constituant des scénarios d'accidents majeurs concernant les silos de stockage de combustible, les espaces bâtimentaires et la chaudière sont présentés dans le tableau 4 ci-après.

Dans le cas des silos, les exemples d'événements initiateurs suivants que fournit le guide de l'état de l'art sur les silos ont été intégrés dans ce tableau :

- dysfonctionnement de l'asservissement entre manutention et aspiration (au démarrage de la manutention ou à l'arrêt de l'aspiration) ;
- apparition d'une source d'inflammation potentielle sur un équipement : par exemple échauffement dû à un départ de bande non détecté ;
- non-respect des conditions prévues par un permis de feu ou intervention par point chaud sans permis de feu ;
- intervention avec points chauds ayant entraîné un départ de feu ;
- échauffement sur un matériel électrique ou mécanique à une température supérieure aux paramètres pris en compte pour déterminer l'adéquation du matériel dans une zone potentiellement à atmosphère explosive ;
- dépassement de la consigne sur un auto-échauffement non maîtrisé avant transition vers l'auto-inflammation.

N°	Système étudié	Sous-système	Causes	Événements redoutés centraux et causes	Phénomènes dangereux
A	Silo de stockage de combustible • <i>silo plat</i> • <i>silo vertical</i>	Silo tampon (étape de préparation du combustible)	- Présence permanente de combustible et présence normale de poussières ET Présence d'une source d'inflammation : - Courants vagabonds - Cigarette - Travaux par point chaud - Foudre	Mise en suspension et inflammation d'un nuage de poussières	Explosion de poussières dans le silo
		OU Silo de stockage (plat ou vertical)	- défaillance électrique - Etincelle électrostatique - Etincelle mécanique ou échauffement suite au frottement d'une pièce métallique dans le silo - Etincelle électrique suite à une défaillance électrique ou étincelle mécaniques suite à un échauffement des engins de manutention ou des systèmes de désilage - Introduction de particules incandescentes	Inflammation de la matière combustible	Incendie dans le silo
		OU Silo ou trémie d'alimentation de la chaudière	Auto-échauffement activé par fermentation ou par réaction d'oxydo-réduction du combustible dans le silo en cas de : - Produit livré non conforme: trop humide, granulométrie hors spécifications (trop fine), présence de produits étrangers, température trop élevée du produit stocké - infiltration d'eau dans le produit stocké - temps de séjour trop long dans le silo	Inflammation de l'ATEX air/CO suite au dégagement de CO dû à l'auto-échauffement	Explosion de CO dans le silo
				Auto-échauffement puis auto-inflammation du combustible	Incendie dans le silo
B	Espaces bâtementaires	Espaces bâtementaires	Présence de poussières en suspension (suite à défaut d'étanchéité des équipements, rupture ou débordement d'un convoyeur ou d'un équipement par exemple) formant un nuage de poussières ET Source d'inflammation : - Courants vagabonds - Cigarette - Travaux par point chaud - Foudre - défaillance électrique - Etincelle électrostatique - Etincelle électrique ou échauffement mécanique d'un équipement se trouvant dans l'espace bâtementaire	Inflammation d'un nuage de poussières	Explosion de poussières
			Présence d'un dépôt de poussières (suite à défaut d'étanchéité des équipements, rupture ou débordement d'un convoyeur ou d'un équipement par exemple) ET propagation d'une explosion d'un premier espace bâtementaire vers l'espace étudié (silos, galerie, tour, etc.)	Mise en suspension du dépôt de poussières et inflammation d'un nuage de poussières	Explosion de poussières

N°	Système étudié	Sous-système	Causes	Événements redoutés centraux et causes	Phénomènes dangereux
C	Chaudières TE/TF	Brûleur / chambre de combustion	- Perte de flamme suite à un défaut de gaz ou de comburant (air insuffisant) à l'allumage ou en appoint en fonctionnement normal si appoint utilisé - Fuite sur organe combustible en phase d'arrêt de la chaudière ET Source d'inflammation : Etincelle apportée par l'opération de réallumage de la chaudière	Accumulation de gaz naturel dans la chambre de combustion	Explosion de la chambre de combustion
			- Débit nul/faible d'extraction des gaz de combustion suite à une défaillance matérielle - Mauvaise combustion du combustible et extraction insuffisante par rapport à la quantité de gaz dégagés - Accumulation de mâchefers dans le foyer et collage des cendres sur les parois empêchant la bonne évacuation des gaz de combustion ET Source d'inflammation : Flamme de la chaudière	Accumulation de gaz de combustion dans la chambre de combustion	
		Capacité d'eau (ballon d'eau pour TE / calandre pour TF)	- Défaut de régulation de pression - Échauffement par incendie à proximité	Surpression dans la capacité d'eau (ballon d'eau pour TE, calandre pour TF)	BLEVE de la capacité d'eau (pressurisation lente)
			- Défaut d'alimentation en eau - Défaillance d'un détecteur de niveau d'eau dans la calandre	Remise en eau sur TF surchauffés	<i>Vaporisation brutale d'eau et éclatement de la calandre pour TF (pressurisation rapide)</i>
		Surchauffeur (TE)	Débit de vapeur en entrée du surchauffeur trop important	Surpression dans le surchauffeur (TE)	<i>Éclatement du surchauffeur</i>

Tableau 4 : Événements redoutés centraux et phénomènes dangereux associés susceptibles de conduire à des scénarios d'accidents majeurs

Il est précisé que si les sources d'inflammation dans un silo peuvent différer selon le type de silo et les moyens de manutention du combustible associé, les phénomènes dangereux sont les mêmes.

4.3 BARRIERES DE SECURITE

Pour chaque phénomène dangereux identifié ci-avant, les barrières de sécurité concernant les silos, les espaces bâtimentaires et les chaudières ont été identifiées à partir :

- des textes réglementaires ;
- des référentiels normatifs, de l'état de l'art et des bonnes pratiques des installations déjà en fonctionnement.

Ces barrières figurent sur les nœuds papillons avec la fonction de sécurité qu'elles sont censées remplir et sont listées dans les tableaux figurant après ces nœuds papillons au § 4.4.

Elles sont complétées en annexe G par des barrières relatives aux autres équipements considérés dans ce guide comme ne générant pas d'accidents majeurs.

La liste de ces barrières n'a pas vocation à être exhaustive, les barrières listées sont à considérer comme des exemples.

Dans le cas où une estimation de la probabilité des accidents est requise, l'exploitant pourra réaliser une évaluation de la performance de ces barrières (évaluation non réalisée dans le cadre de ce guide, au regard de l'absence de données recensées sur les événements initiateurs – cf. § 6), en s'appuyant sur les méthodologies décrites dans les deux référentiels disponibles sur le site internet de l'INERIS :

- Oméga 1013 pour les barrières techniques de sécurité ;
- Oméga 2014 pour les barrières humaines de sécurité. Pour les barrières humaines de sécurité la fiche n°7 de la circulaire du 10 mai 2010 fournit également une méthodologie d'évaluation.

En annexe F, figurent les principaux référentiels réglementaires, normatifs ou relatifs à l'état de l'art ayant permis d'identifier ces principales barrières, ainsi que les prescriptions exigées par la réglementation pour les silos relevant du régime d'autorisation en application de la rubrique 2160.

¹³ Rapport DRA-08-95403-01561B « Evaluation des performances des Barrières Techniques de Sécurité (DCE DRA-73) - Evaluation des Barrières Techniques de Sécurité - Ω 10 » du 01/09/2008 ;

¹⁴ Rapport DRA-09-103041-06026B « Démarche d'évaluation des Barrières Humaines de Sécurité - Ω 20 - Programme 181 - DRA 77 : Maîtrise des risques accidentels par les dispositions technologiques et organisationnelles » du 21/09/2009

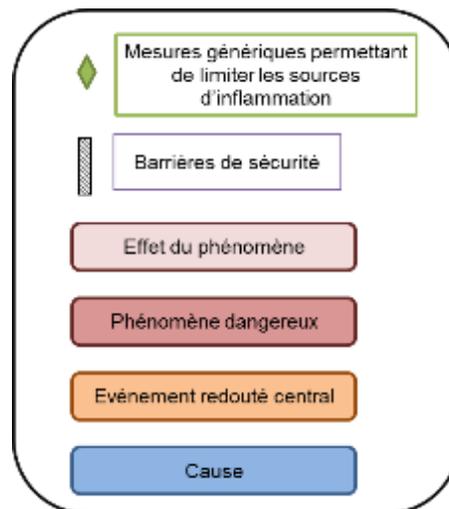
4.4 SYNTHÈSE DES SCÉNARIOS D'ACCIDENT RETENUS

4.4.1 PREALABLE SUR LES SCÉNARIOS D'ACCIDENTS MAJEURS RETENUS

Ce paragraphe a pour objectif de présenter les scénarios d'accidents majeurs retenus avec des barrières de sécurité agissant en prévention ou en protection de ces scénarios. L'outil utilisé pour cela est le nœud papillon (combinaison d'un arbre de défaillances et d'un arbre d'événements autour d'un événement redouté central).

Ces nœuds papillons permettent notamment d'identifier les barrières de sécurité et des bonnes pratiques. Les barrières pourraient être utiles à valoriser dans le cadre de l'estimation du niveau de risque (cf. chapitre 6).

La légende suivante est utilisée pour ces nœuds papillons :



Remarques générales :

- Les événements initiateurs peuvent être de plusieurs types :
 - Événements d'origine externe :
 - Cause naturelle : séisme, foudre, neige et vent, inondation, etc.,
 - Cause anthropique : chute d'aéronefs, effets dominos externes, etc. ;
 - Événements d'origine interne : événements liés au procédé, travaux, effets dominos internes.

Dans les nœuds papillon présentés ci-après, tous les événements qui ne sont pas liés à des effets dominos ou propres au procédé sont traités de façon générique sous la dénomination « agressions externes ». Ils seront à traiter de façon plus détaillée dans le cadre d'une EDD.

- Il est rappelé que les barrières proposées ne sont pas exhaustives et ne doivent pas toutes être considérées comme des exigences. Ce sont des propositions en vue de faciliter l'analyse de risques. Leurs performances sont à évaluer en fonction du contexte dans lequel elles sont utilisées.

Elles sont représentées par des rectangles  sur les nœuds papillon.

- Les mesures génériques permettant de limiter les sources d'inflammation sont les suivantes :

Nom	Description des mesures génériques ou bonnes pratiques
Inf1	Interdiction de fumer
Inf2	Permis de feu/ Plan de prévention
Inf3	Protection contre la foudre
Inf4	Contrôler les installations électriques
Inf5	Assurer l'équipotentialité et mettre à la terre

Tableau 5 : Mesures pour limiter les sources d'inflammation

Elles sont représentées par des losanges  sur les nœuds papillon.

- Un point de vigilance est mis en avant concernant le fonctionnement des barrières de sécurité intervenant en protection des scénarios d'accidents majeurs. Le bon fonctionnement de ces barrières peut mener à des phénomènes dangereux d'intensité moindre ou supprimer la possibilité d'occurrence d'un phénomène dangereux. Sur un nœud papillon, cela est généralement représenté par une branche de l'arbre d'événements qui part de la barrière de sécurité et mène à un phénomène dangereux d'intensité moindre ou nulle.

4.4.2 SILOS

Le nœud papillon du scénario d'incendie d'un silo de stockage et celui d'explosion dans un silo de stockage sont présentés ci-après, sur la base des séquences accidentelles identifiées au Tableau 4 et des référentiels cités en annexe F; ces nœuds papillons concernent un silo plat ou un silo vertical.

Pour les silos, les sources d'inflammation sont présentées sur le nœud suivant :

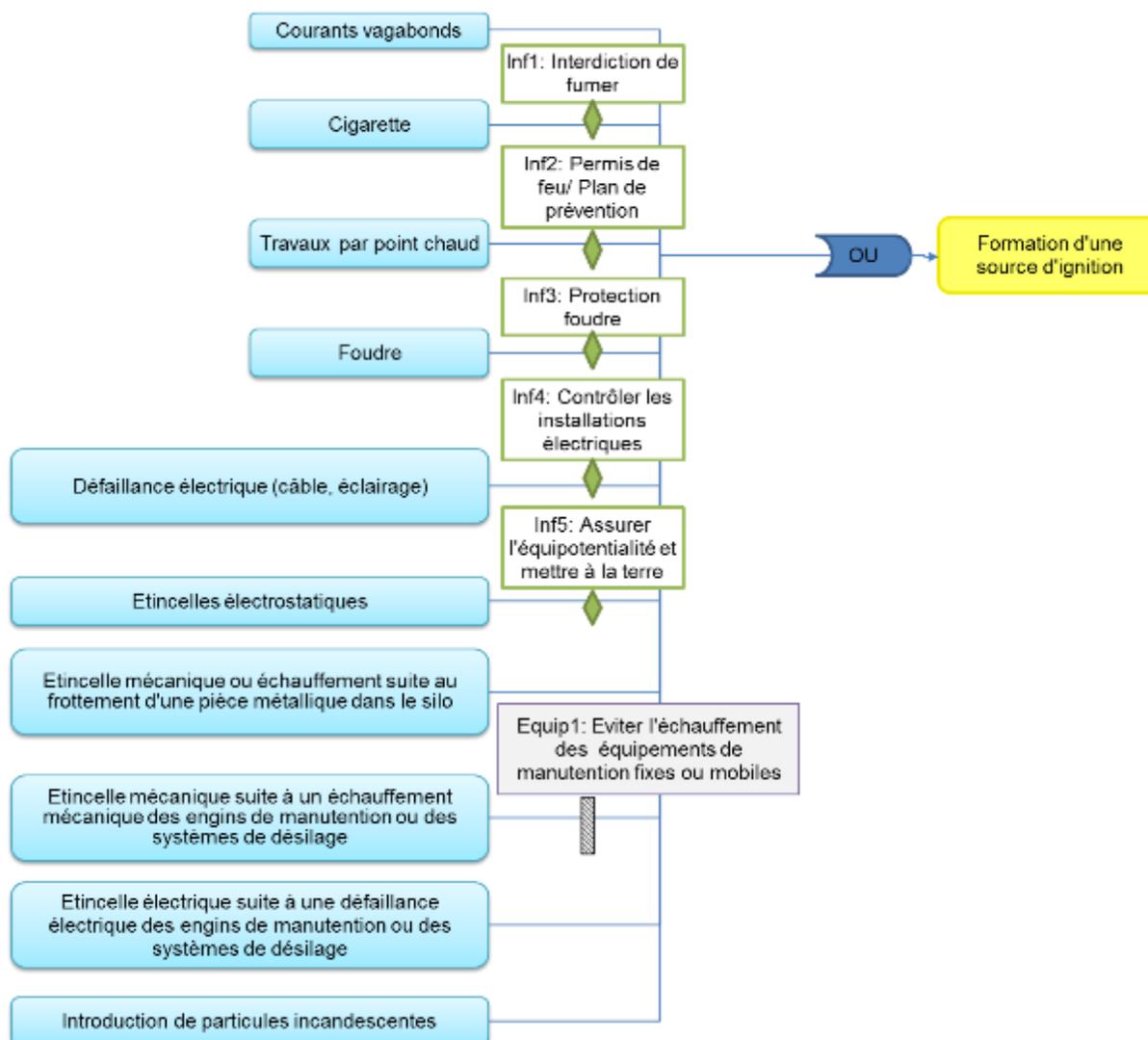


Figure 4 : Sources d'inflammation dans le cas d'un silo vertical ou d'un silo plat

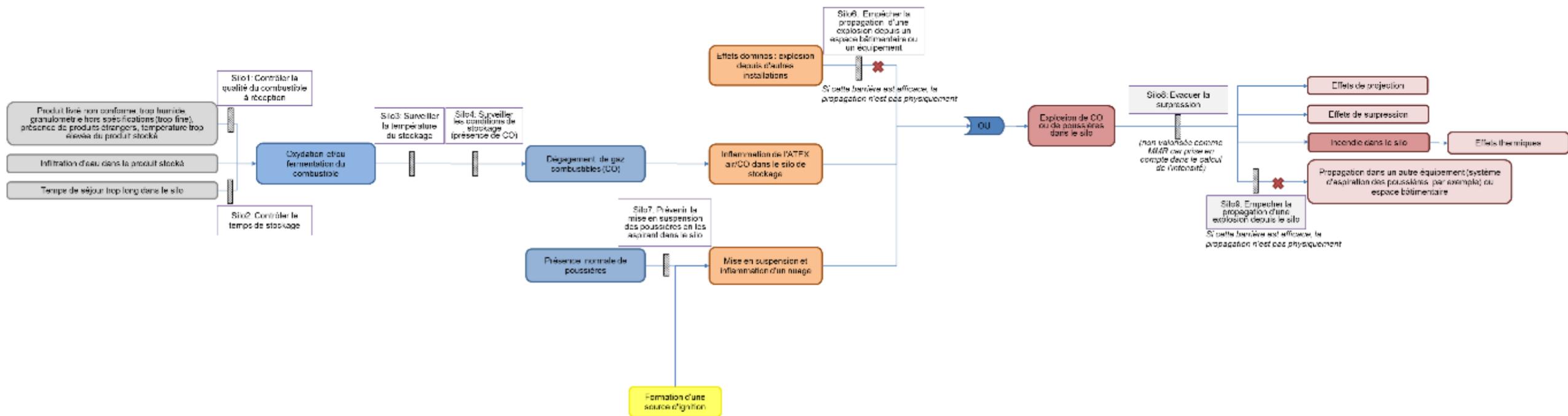


Figure 5 : Représentation du scénario d'explosion d'un silo vertical ou d'un silo plat selon le modèle du nœud-papillon

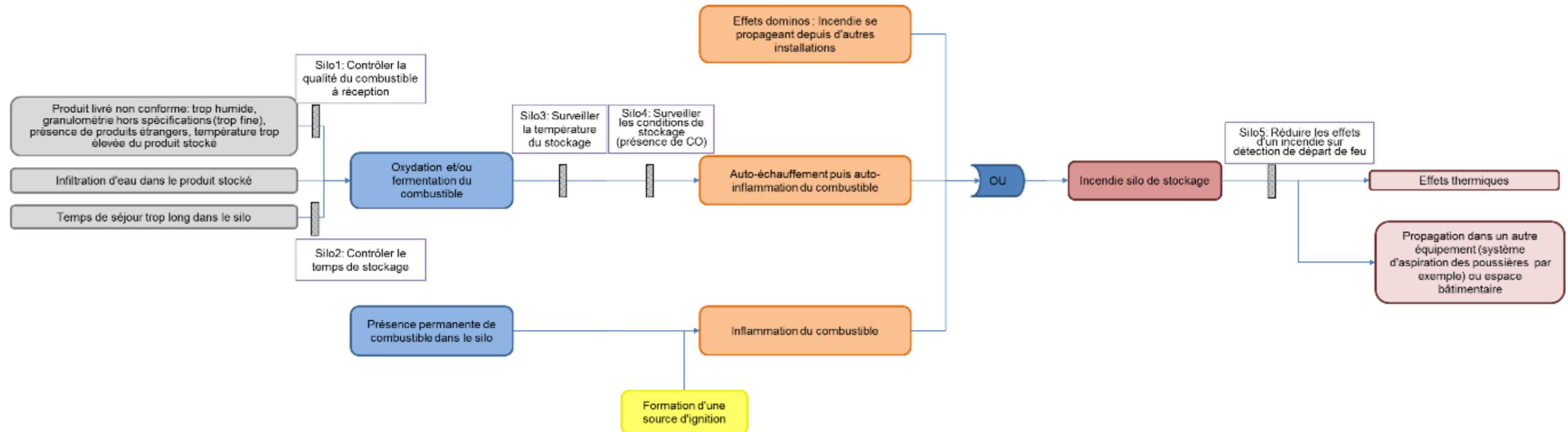


Figure 6 : Représentation du scénario d'incendie d'un silo vertical ou d'un silo plat selon le modèle du nœud-papillon

Remarques :

- Il est précisé que ces scénarios sont applicables aux silos tampon de préparation du combustible, aux silos de stockages, aux silos tampon d'alimentation de la chaudière. Dans le cas de la trémie d'alimentation de la chaudière, une adaptation est nécessaire, le scénario n'est pas retenu ici car le volume de la trémie est faible (quelques m³) et les effets de surpression ne sortiraient pas des limites de site. Toutefois, le nœud-papillon serait applicable en l'adaptant afin de prendre en compte les sources d'inflammation spécifiques à la trémie (remontée de gaz chauds de la chaudière), ainsi que les barrières spécifiques (cf. tableau en annexe D).
- Les dispositions constructives qui permettent de réduire les phénomènes d'auto-échauffement en adaptant la dimension du stockage par rapport à la température de stockage (cf. § 2.2.1) ne sont pas considérés comme des barrières mais permettent de réduire la fréquence de ces phénomènes.
- En cas d'incendie se propageant depuis un autre équipement (en particulier les équipements de transfert) ou d'un autre espace bâtiminaire, les moyens d'intervention contre l'incendie au niveau de ces autres installations permettront de maîtriser le phénomène dangereux.
- L'explosion dans le silo peut être due à une explosion de poussières ou à une explosion du CO formé par auto-échauffement du combustible. Les effets seront les mêmes et dans la partie intensité au § 0, seuls les effets d'une explosion de poussières sont modélisés.

Les tableaux ci-après reprennent les barrières figurant sur les nœuds papillons en précisant les fonctions et des exemples de mise en œuvre. Il est également indiqué si cette barrière est obligatoire réglementairement.

Barrières de prévention :

Nom	PhD concerné	Fonction de sécurité	Exemples d'éléments de barrière	Barrière réglementaire pour les silos
Silo1	Incendie Explosion	Contrôler la qualité du combustible à réception – température et humidité	Vérification des conditions de température, humidité avant l'ensilage des combustibles solides par des prises d'échantillons, des mesures thermiques (capteurs), des mesures d'hygrométrie. Pas d'ensilage si produit non conforme	Article 14 de l'arrêté du 29 mars 2004
Silo2	Incendie Explosion	Contrôler le temps de stockage	Mise en place de procédures dédiées afin d'assurer un turn-over des combustibles et réduire le temps de stockage (taux de rotation permettant de limiter l'auto-échauffement)	

Nom	PhD concerné	Fonction de sécurité	Exemples d'éléments de barrière	Barrière réglementaire pour les silos
Silo3	Incendie Explosion	Surveiller la température de stockage pour détecter une augmentation de température	<ul style="list-style-type: none"> • Capteur de température par IR (silo plat) • Sonde de température immergé dans le produit (silo vertical) <p>Le suivi de la température des produits stockés est enregistré.</p> <p>Une détection d'élévation de température peu importante peut conduire à une ventilation du silo ou une vidange. Si la température est relativement haute, la ventilation sera évitée pour ne pas alimenter l'incendie.</p>	Article 14 de l'arrêté du 29 mars 2004
Silo4	Incendie Explosion	Surveiller les conditions de stockage (présence de CO)	Capteur de gaz fixe ou mobile, avec évacuation du produit ou extinction	Article 14 de l'arrêté du 29 mars 2004
Silo6	Explosion	Empêcher la propagation d'une explosion depuis un espace bâtementaire ou un équipement	<p>Découplage</p> <p><i>Démonstration de l'efficacité du dispositif mis en œuvre par rapport à la nature de l'explosion. Si efficacité démontrée, l'EI peut être exclu.</i></p>	Article 10 de l'arrêté du 29 mars 2004
Silo7	Explosion	Prévenir la mise en suspension des poussières en les aspirant dans le silo (et particulièrement aux points de chute)	Systèmes d'aspiration des poussières au niveau des silos (mais aussi des équipements et notamment des installations de transfert) et en cas d'arrêt de ce système d'aspiration au niveau du silo, arrêt de la manutention vers le silo	Article 15 de l'arrêté du 29 mars 2004 : Aspiration avec double asservissement obligatoire pour les installations de manutention Article 13 de l'arrêté du 29 mars 2004
Equip1	Incendie Explosion	Éviter l'échauffement des équipements de manutention fixes ou mobiles	<p>Arrêt de l'équipement sur :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capteur de la surintensité moteur • Capteur de la rotation • Capteur du déport de sangle/chaine/bande • Capteur de bourrage • Capteur de température des paliers 	

Légende : en gras : barrière issue de l'arrêté du 29 mars 2004

Tableau 6 : Barrières de prévention en cas d'incendie ou d'explosion d'un silo plat ou vertical

Barrières de protection :

Nom	PhD concerné	Fonction de sécurité	Exemples d'éléments de barrière	Barrière réglementaire pour les silos
Silo5	Incendie	Réduire les effets d'un incendie sur la détection d'un départ de feu ou autre (par exemple, détection de température - silo3 ou détection de CO - silo 4 ou détection de fumées ou détection d'une baisse de la concentration en oxygène)	Détection incendie (fumées, température, CO, etc.) et : <ul style="list-style-type: none"> • Désenfumage/évacuation des gaz-fumées-imbrûlés par des bouches d'extraction avec une ventilation, des ouvertures permanentes • Trappes d'inertage avec un système d'injection de gaz présentant une quantité suffisante stockée d'agent d'inertage et un dimensionnement du débit d'injection adapté (afin de réduire la quantité d'oxygène et réduire l'intensité de la combustion) • Aspersion d'eau dans le silo depuis le haut de ce dernier /Sprinklage • Trappe de vidange pour évacuer le combustible du silo (cas de silos verticaux) 	Article 11 de l'arrêté du 29 mars 2004 : Inertage au gaz obligatoire réglementairement pour les silos béton soumis à autorisation
Silo8	Explosion	Évacuer la surpression	<ul style="list-style-type: none"> • Event (*) • Surfaces soufflables (*) 	
Silo9	Explosion	Empêcher la propagation d'une explosion depuis le silo <i>(uniquement si le silo est muni d'un système d'évacuation de la surpression - silo11)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Découplage • Vanne éclose • Clapet anti-retour • Système d'extinction rapide (suppresseurs d'explosion) <p><i>Démonstration de l'efficacité du dispositif mis en œuvre par rapport à la nature de l'explosion. Si efficacité démontrée, l'EI peut être exclu</i></p>	Article 10 de l'arrêté du 29 mars 2004

(*) les événements ou surfaces soufflables sont des dispositions constructives prises en compte pour l'évaluation de l'intensité du phénomène dangereux et ne sont de ce fait pas valorisées comme MMR pour le calcul de la probabilité d'une explosion.

Légende : **en gras** : barrière issue de l'arrêté du 29 mars 2004

Tableau 7 : Barrières de protection en cas d'incendie ou d'explosion d'un silo plat ou vertical

Remarque : une attention particulière devra être portée au système de sprinklage, afin d'éviter lors de la mise en eau de la colonne, une mise en suspension de poussières par l'air éjectée de la colonne, qui pourrait conduire à une explosion.

4.4.3 EXPLOSION D'UN ESPACE BATIMENTAIRE

Le nœud papillon du scénario d'explosion dans un espace bâtiminaire est présenté ci-après, sur la base des séquences accidentelles identifiées au Tableau 4 et des référentiels cités en annexe F.

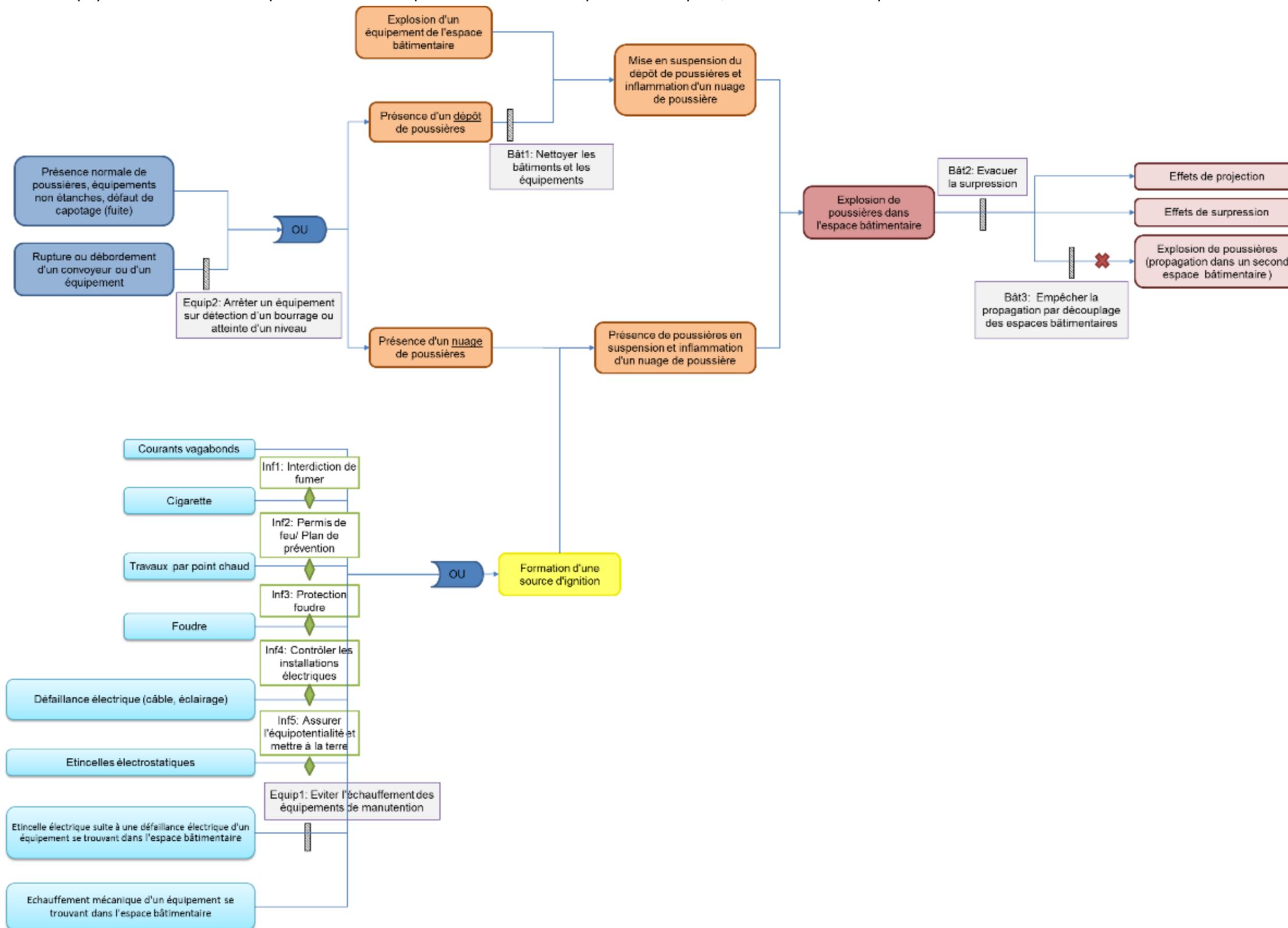


Figure 7 : Représentation du scénario d'explosion d'un espace bâtiminaire selon le modèle du nœud-papillon

Remarques :

- Les exigences réglementaires relatives à la conception, l'installation, l'entretien, les périmètres d'éloignement par rapport aux limites de site, le nettoyage, la maintenance et l'exploitation doivent être respectées.
- Le capotage des équipements permet de réduire l'envol des poussières, de même que certaines pratiques telles que la brumisation des poussières ou la réduction des chutes de hauteur de combustible ou des mouvements de combustibles.
- L'explosion d'un espace bâtiminaire n'a pas été caractérisée en termes de distances d'effet dans le cadre de ce guide. En effet, les situations sont propres à chaque site et aux équipements qu'il possède. Il est donc recommandé d'étudier et le cas échéant de modéliser ces phénomènes au cas par cas.
- Les dispositions constructives doivent permettre de limiter les galeries enterrées, les espaces confinés et de les compartimenter autant que possible.

Les tableaux ci-après reprennent les barrières figurant sur les nœuds papillons en précisant les fonctions et des exemples de mise en œuvre.

Barrières de prévention :

Nom	Fonction de sécurité	Exemples d'éléments de barrière	Barrière réglementaire
Equip1	Éviter l'échauffement des équipements de manutention fixes ou mobiles	Arrêt de l'équipement sur : <ul style="list-style-type: none">• Capteur de la surintensité moteur• Capteur de la rotation• Capteur du déport de sangle/chaîne/bande• Capteur de bourrage• Capteur de température des paliers	
Equip2	Arrêter un équipement sur détection d'un bourrage ou atteinte d'un niveau	Capteur de bourrage et arrêt de l'équipement	
Bât1	Contrôler régulièrement la propreté et nettoyer les bâtiments et les équipements	Nettoyage des espaces bâtiminaires, des aires de chargement des produits avec une fréquence adaptée pour réduire la quantité de poussières à une valeur acceptable. Le nettoyage se fait à l'aide d'aspirateurs ou d'une centrale d'aspiration (le nettoyage avec balai ou air comprimé sont exclus ou encadrés).	Article 13 de l'arrêté du 29 mars 2004 : Nettoyage des bâtiments

Tableau 8 : Barrières de prévention en cas d'explosion d'un espace bâtiminaire

Barrières de protection :

Nom	Fonction de sécurité	Exemples d'éléments de barrière	Barrière réglementaire
Bât2	Évacuer la surpression	<ul style="list-style-type: none">• Event• Surfaces soufflables	Article 10 de l'arrêté du 29 mars 2004
Bât3	Empêcher la propagation d'une explosion par découplage des espaces bâtiminaires (uniquement si un système d'évacuation de la surpression Bât2 est en place)	Découplage <i>Démonstration de l'efficacité du dispositif mis en œuvre par rapport à la nature de l'explosion. Si efficacité démontrée, l'EI peut être exclu.</i>	Article 10 de l'arrêté du 29 mars 2004

Tableau 9 : Barrières de protection en cas d'explosion d'un espace bâtiminaire

4.4.4 CHAUDIERE

4.4.4.1 CHAMBRE DE COMBUSTION ET CAPACITE D'EAU DE LA CHAUDIERE

Les nœuds papillons du scénario d'explosion de la chambre de combustion d'une chaudière et du BLEVE de la capacité d'eau de cette chaudière sont présentés ci-après, sur la base des séquences accidentelles identifiées au Tableau 4 et des référentiels cités en annexe F.

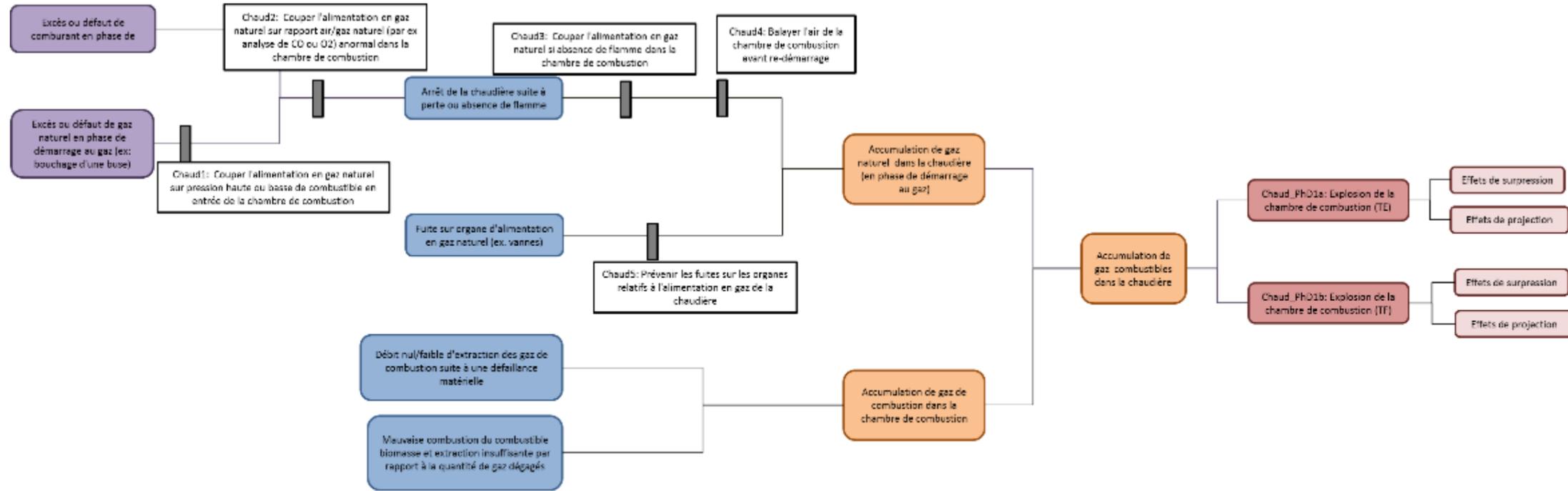


Figure 8 : Représentation du scénario d'explosion de la chambre de combustion de la chaudière selon le modèle du nœud-papillon

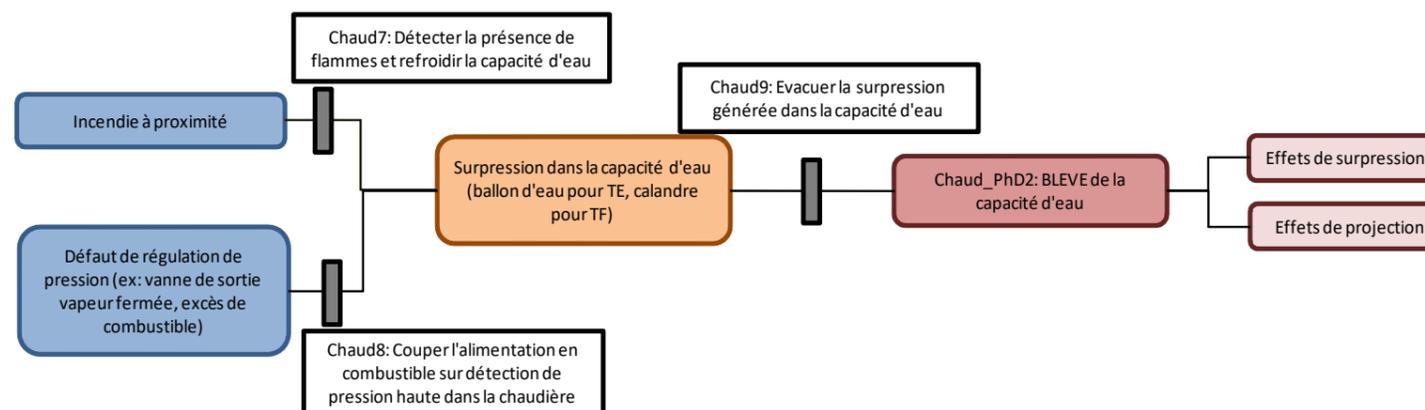


Figure 9 : représentation du scénario de BLEVE de la capacité d'eau d'une chaudière selon le modèle du nœud-papillon

Barrières de prévention :

Nom	Fonction de sécurité	Exemples d'éléments de la barrière
Chaud1	<i>Couper l'alimentation en combustible sur pression haute ou basse de combustible en entrée de la chambre de combustion</i>	<i>Asservissement de l'alimentation en combustible sur la pression de combustible en entrée de la chambre de combustion</i>
Chaud2	<i>Couper l'alimentation en combustible sur rapport air/combustible (par ex analyse de CO ou O₂) anormal dans la chambre de combustion</i>	<i>Asservissement de l'alimentation en combustible sur le rapport air / combustible dans la chambre de combustion</i>
Chaud3	<i>Couper l'alimentation en combustible si absence de flamme dans la chambre de combustion</i>	<i>Asservissement de l'alimentation en combustible sur la présence de la flamme dans la chambre de combustion</i>
Chaud4	<i>Couper l'alimentation en combustible sur température anormale dans la chambre de combustion</i>	<i>Asservissement de l'alimentation en combustible sur la température dans la chambre de combustion</i>
Chaud5	<i>Prévenir les fuites sur les organes relatifs au combustible lors de l'arrêt de la chaudière</i>	<i>Actions de contrôle d'étanchéité, purge, etc identifiées dans la procédure de mise en service / d'arrêt de la chaudière</i>
Chaud6	<i>Balayer l'air de la chambre de combustion avant re-démarrage</i>	<i>Action de balayage intégrée dans la séquence de ré-allumage de la chaudière</i>
Chaud7	<i>Détecter la présence de flammes et refroidir la capacité d'eau</i>	<i>Déluge dans la chaufferie suite à détection incendie ou détection humaine</i>
Chaud8	<i>Couper l'alimentation en combustible sur détection de pression haute dans la chaudière</i>	<i>Asservissement de l'alimentation en combustible sur détection de pression haute dans la chaudière</i>

Tableau 10 : Exemples de barrières de prévention en cas d'explosion de la chambre de combustion d'une chaudière ou de BLEVE de la capacité d'eau de cette chaudière

Barrières de protection :

Nom	Fonction de sécurité	Exemples d'éléments de la barrière
Chaud9	<i>Evacuer la surpression générée dans la capacité d'eau</i>	<i>Soupape de sécurité de la chaudière</i>

Tableau 11 : Exemples de barrières de protection en cas d'explosion de la chambre de combustion d'une chaudière ou de BLEVE de la capacité d'eau de cette chaudière

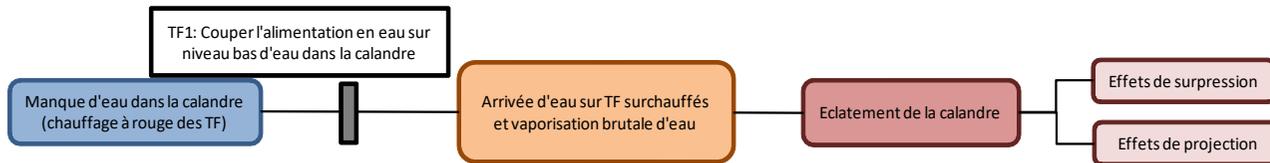
Légende:

Barrière étudiée en détails dans l'Annexe 5

Barrière issue d'exigences réglementaires ou normatives

4.4.4.2 CHAUDIERE A TUBES DE FUMEEES

Le nœud papillon du scénario d'éclatement de la calandre d'une chaudière à tubes de fumées est présenté ci-après, sur la base de la séquence accidentelle identifiée au Tableau 4 et des référentiels cités en annexe F.



Remarques :

- Une vaporisation brutale d'eau suite à une remise en eau sur des tubes de fumées surchauffés peut générer un éclatement de la calandre (pressurisation rapide). Un ordre de grandeur des distances des effets de surpression associés peut être obtenu en exploitant les abaques du BLEVE de la capacité d'eau (voir Annexe H).
- Une vaporisation d'eau peut avoir lieu suite à une fuite sur un tube de fumées. Les effets redoutés sont une déformation de la calandre voire un arrachement du brûleur, mais ils restent limités.
- Un retour de combustible liquide dans le circuit de vapeur servant à réchauffer les bacs de combustible liquide peut mener à une cokéfaction sur les tubes de fumées et une surchauffe de ces derniers. Un affaissement des faisceaux de tubes peut alors avoir lieu mais les effets restent limités.
- Un surremplissage en eau dans la chaudière peut avoir lieu suite à une défaillance des jaugeurs de niveau (à cause par exemple d'un retour de polluants depuis la bêche alimentaire suite à un mauvais traitement d'eau). Les effets redoutés restent limités (par exemple déformation de la calandre).

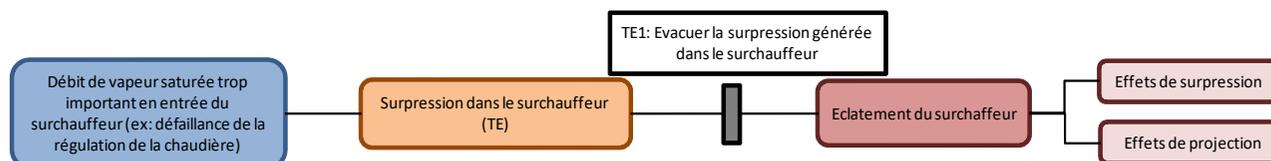
Barrières de prévention :

Nom	Fonction de sécurité	Exemples d'éléments de la barrière
TF1	Couper l'alimentation en eau sur niveau bas d'eau dans la calandre	Asservissement de l'alimentation en eau sur détection de niveau bas d'eau dans la chaudière

Tableau 12 : Barrières de prévention en cas d'éclatement d'une chaudière à tubes de fumées

4.4.4.3 CHAUDIERE A TUBES D'EAU AVEC SURCHAUFFEUR

Le nœud papillon du scénario d'éclatement du surchauffeur d'une chaudière à tubes d'eau est présenté ci-après, sur la base de la séquence accidentelle identifiée au Tableau 4 et des référentiels cités en annexe F.



Remarques :

- Un débit de vapeur saturée trop important en entrée du surchauffeur peut générer une surpression dans le surchauffeur, menant à l'éclatement de celui-ci. Un ordre de grandeur des distances des effets de surpression associés peut être obtenu en exploitant les abaques du BLEVE de la capacité d'eau (voir Annexe H).
- Une vaporisation brutale d'une faible quantité d'eau dans la chambre de combustion de la chaudière peut avoir lieu suite à une fuite sur un tube d'eau. Les effets redoutés sont une déformation de la paroi de la chambre voire un arrachement du brûleur, mais ils restent limités.

Barrières de protection :

Nom	Fonction de sécurité	Exemples d'éléments de la barrière
TE1	Evacuer la surpression générée dans le surchauffeur	Soupape de sécurité du surchauffeur

Tableau 13 : Barrières de protection en cas d'éclatement du surchauffeur d'une chaudière à tubes d'eau

5 CARACTERISATION DE L'INTENSITE DES PHENOMENES DANGEREUX

Ce chapitre présente les principes d'évaluation des intensités des phénomènes dangereux récapitulés au paragraphe 5.1 ci-après. Il s'articule en trois parties :

- Synthèse des phénomènes dangereux modélisés ;
- Principales hypothèses de modélisation ;
- Données de base générales pour les modélisations.

Les distances d'effets sont présentées dans l'annexe H, sous forme d'abaques.

5.1 SYNTHESE DES PHENOMENES DANGEREUX MODELISES

Les phénomènes dangereux modélisés et listés dans le tableau 14 ci-après sont :

- Les explosions de poussières dans un silo de stockage de bois ;
- Les incendies dans un silo de stockage de bois ;
- Les explosions de chaudières ;
- Les BLEVE de capacité d'eau.

Remarques :

- Il est rappelé que le démarrage des chaudières à biomasse peut se faire avec du gaz et que, en cas de fuite de gaz, une fuite des tuyauteries de gaz conduirait à des scénarios de feu torche, d'UVCE ou d'explosion du local chaufferie ; ces scénarios ne sont pas détaillés dans le cadre de ce guide. Leur modélisation figure dans le guide pour la prise en compte des chaudières industrielles dans la rédaction d'une étude de dangers [1].
- Certains phénomènes dangereux considérés comme pouvant conduire à des accidents majeurs, figurant dans le tableau 4 et illustrés sur les nœuds papillon présentés aux paragraphes précédents n'ont pas été modélisés ils sont à traiter au cas par cas : c'est en particulier le cas de l'explosion d'un espace bâtiminaire.
- L'explosion dans le silo peut être due à une explosion de poussières ou à une explosion du CO formé par auto-échauffement du combustible. Les effets seront les mêmes et dans la partie intensité au § 0, seuls les effets d'une explosion de poussières sont modélisés.
- De même, seul le scénario d'explosion de gaz dans la chambre de combustion est modélisé. Il est considéré que ce scénario d'explosion de gaz couvre le scénario d'explosion de poussières ou de CO dans la chambre de combustion. Dans le cas où la chaudière ne serait pas démarrée à l'aide de gaz naturel, une modélisation spécifique d'explosion de CO ou de gaz de pyrolyse pourrait être réalisée.

N°	Système étudié	Sous-système	Événements redoutés centraux	Phénomènes dangereux	Paramètres clés pour la modélisation des effets
A	Silo de stockage de combustible (silo plat ou silo vertical)	Silo tampon (étape de préparation du combustible)	Mise en suspension et inflammation d'un nuage de poussières	Explosion de poussières dans un silo	Fonction du matériau (résistance mécanique des parois et détermination surfaces soufflables) et des caractéristiques géométriques (volume, dimensions, ratios entre les dimensions) du silo
		OU Silo de stockage	Inflammation de l'ATEX air/CO suite au dégagement de CO dû à l'auto-échauffement		
		OU Silo ou trémie d'alimentation de la chaudière	Inflammation de la matière combustible Auto-inflammation du combustible	Incendie du silo	Fonction du matériau et des caractéristiques géométriques (volume, dimensions, ratios entre les dimensions) du silo
C	Chaudières TE/TF	Brûleur / chambre de combustion	Accumulation de CO ou de gaz naturel (propane) dans la chambre de combustion (à l'allumage ou en appoint en fonctionnement normal si appoint utilisé)	Explosion de la chambre de combustion	Fonction du volume de la chambre de combustion et de la résistance des parois
		Capacité d'eau (ballon d'eau pour TE / calandre pour TF)	Surpression dans la capacité d'eau (ballon d'eau pour TE, calandre pour TF)	BLEVE de la capacité d'eau (pressurisation lente)	Fonction du volume de la capacité d'eau et de la pression de rupture

Tableau 14 : Synthèse des phénomènes dangereux modélisés

5.2 PRINCIPALES HYPOTHESES DE MODELISATION

5.2.1 GENERALITES

Les résultats de modélisation consistent en des courbes paramétrées présentant les distances aux effets létaux significatifs, effets létaux, effets irréversibles et effets indirects, atteintes par les différents phénomènes dangereux identifiés dans le tableau 14, et ce en fonction de plusieurs paramètres.

L'objet des paragraphes ci-dessous est de présenter les hypothèses générales de modélisation et paramètres utilisés pour la construction des abaques. Les hypothèses plus précises sur chaque scénario modélisé sont présentées en Annexe H, ainsi que les abaques obtenus.

Points de vigilance

- Les résultats sont à considérer comme des ordres de grandeur permettant d'avoir une première estimation des distances d'effet dans le cadre de la réalisation d'une EDD, d'avoir un regard critique sur des distances d'effets obtenues pour une installation donnée dans le cadre d'une EDD ou pour positionner une installation par rapport aux limites de site.
- Dans le cadre de ce guide, les modélisations d'explosion de nuage de poussières ont été réalisées en considérant que les poussières sont de **classe ST1**. Dans le cas de poussières d'autre classe, il sera nécessaire de refaire des modélisations. Il à noter que certaines poussières, de bois notamment, sont de classe ST2.
- Pour rappel, la toxicité des fumées n'a pas été modélisée dans le cadre de la présente étude. Toutefois, selon la biomasse utilisée, ce point devra faire l'objet d'une vérification.

5.2.2 CARACTERISTIQUES DES SILOS

De manière générale, pour l'incendie et l'explosion, deux types de silos sont retenus dans les modélisations : les silos aériens verticaux et les silos aériens plats (aussi dénommés silos horizontaux dans l'annexe H). Les silos enterrés ne sont pas pris en compte dans cette étude.

5.2.2.1 INCENDIE DE SILOS

L'inflammation du combustible dans le silo est susceptible de conduire à la fragilisation de la structure puis à son effondrement, que le silo soit plat ou vertical.

Les principales hypothèses de modélisations pour chaque type de silo sont résumées dans le tableau 15 ci-dessous et détaillées en annexe H.

Type de silo	Vertical	Plat
Volumes en m ³	[100 - 5000]	[100 - 5000]
Ratio (D/h)	Non pris en compte	[2, 3]
Nature des parois du silo	Métallique ou béton (*)	Métallique ou béton (*)

(*) ce paramètre n'intervient pas dans les modélisations réalisées pour l'incendie.

Tableau 15 : Hypothèses des cellules associées aux scénarios d'incendie de silos

Le combustible retenu est du bois, avec les hypothèses de modélisation suivantes :

- Une vitesse de combustion du bois retenue de 5 g/m²/s ;
- Une chaleur de combustion du bois de 18 MJ/kg ;
- Une émittance de flamme fixée à 25 kW/m², valeur mesurée sur des essais réalisés à l'INERIS sur des copeaux de bois.

5.2.2.2 EXPLOSION DE SILOS

Le scénario correspond à une explosion primaire de poussières en cellule. Le cas défavorable d'absence de produit et de présence de poussières dans l'intégralité du volume est considéré. Il est considéré que les poussières présentent un taux d'humidité < 20%.

Les principales hypothèses de modélisations pour chaque type de silo sont résumées dans le tableau 16 ci-dessous et détaillées en annexe H.

Ces hypothèses sont forfaitaires et permettent d'avoir des ordres de grandeur. Dans le cas de l'EDD d'un site, des modélisations propres au site devront être réalisées avec ses hypothèses, en fonction de sa configuration.

Type de silo	Vertical				Plat	
Volumes en m ³	[100 - 5000]				[100 - 5000]	
Ratio (D/H)	[0.25, 0.5 ,1 ,2]				[>2]	
Nature des parois	Métallique		Béton		Béton ou palplanche	
Résistance minimale des parois de cellule à l'explosion (mbar)	200	400	400	800	100	200
Type de matériaux de surfaces soufflables	Tôles métalliques affaiblies ou bardage métallique	Toiture métallique	Toiture béton affaiblie	Toiture béton	Polyester fixé par crochet, surface ouverte, fibrociment, translucides	Tôles métalliques affaiblies ou bardage métallique
Pression de rupture à l'explosion maximale des surfaces soufflables (mbar)	100	200	200	400	60	100
Masse surfacique (kg/m ²)	< 10	< 15	< 250	< 250	< 5	< 10

Tableau 16 : Hypothèses des cellules associées aux scénarios d'explosions de silos

5.2.3 CARACTERISTIQUES DES CHAUDIERES

Les modélisations ont été effectuées pour des chaudières dont les puissances thermiques nominales sont comprises entre 1 et 50 MW_{th}.

Au vu de ces intervalles de puissances, les volumes de chambre de combustion considérés pour une chaudière à tubes d'eau vont de 10 à 150 m³. En l'absence de données d'entrée sur la pression de rupture, sur la forme et sur les matériaux composant la chambre de combustion, le calcul est effectué à partir de l'hypothèses que la pression maximale est atteinte lors de l'explosion, cette pression est égale à 7.1 bar pour le méthane.

Dans le cas d'une chaudière à tubes de fumées, la chambre de combustion consiste en un tube foyer dont il a été considéré que le volume pouvait varier entre 5 et 40 m³. La pression de rupture de chambre de combustion d'une chaudière à tubes d'eau ne dépasse pas 1 bar. Dans le cas d'une chaudière à tubes de fumées, le tube foyer résiste à la pression mais les extrémités de ce tube constituent des parties faibles. La pression s'échapperait donc côté brûleur et boîtes arrière sur les côtés de la chaudière. La pression de rupture de chambre de combustion d'une chaudière à tubes de fumées peut être prise à 1 bar.

Les volumes d'eau liquide contenus dans les capacités (ballon d'eau pour tubes d'eau, calandre de la chaudière pour tubes de fumée) varient de 5 à 250 m³. Les pressions de rupture de ces capacités sont comprises entre 10 et 30 bars.

5.3 PRESENTATION DES MODELES UTILISES

Les modèles suivants ont été utilisés :

- Les effets thermiques de l'incendie de silo sont modélisés au moyen du code FNAP développé par l'INERIS ;
- Les calculs des effets d'explosion de silo et de la chambre de combustion d'une chaudière ont été réalisés à l'aide du logiciel EFFEX, développé par l'INERIS ;
- Les calculs de BLEVE de capacité d'eau des chaudières ont été réalisés à l'aide de l'outil PROJEX.

Le détail de ces modèles figure en annexe H.

5.4 SEUILS D'EFFETS SUR L'HOMME

Les effets des phénomènes dangereux sont des effets de surpression ou des effets thermiques. L'intensité de ces phénomènes dangereux est caractérisée par des distances à des seuils réglementaires définis pour les hommes, conformément aux instructions de l'arrêté du 29 septembre 2005 récapitulées dans le tableau 17 ci-dessous.

	Seuils des effets de surpression	Seuils des effets thermiques	
	mbar	kW/m ²	(kW/m ²) ^{4/3} s
SER : Effets indirects (bris de vitre)	20 ⁽¹⁾	-	-
SEI : Dangers significatifs ou effets irréversibles	50	3	600
SEL : Dangers graves ou effets létaux	140	5	1000
SELS : Dangers très graves ou effets létaux significatifs	200	8	1800

⁽¹⁾ : Compte tenu des dispersions de modélisation pour les faibles surpressions, il peut être adopté pour la surpression de 20 mbar une distance d'effets égale à deux fois la distance d'effets obtenue pour une surpression de 50 mbar.

Tableau 17 : Valeurs seuils des effets sur l'homme des phénomènes dangereux

5.5 RESULTATS

Les distances d'effets sont présentées dans l'annexe H, sous forme d'abaques. Ci-après figurent des synthèses des résultats obtenus.

5.5.1 INCENDIE DE SILOS

Les effets thermiques associés à l'incendie de silos avant et après effondrement ont été évalués. Les différents silos considérés dans l'étude sont les silos plats et verticaux, en acier ou en béton. Plusieurs tailles de silos sont considérées, au moyen de leur volume et du ratio D/h (Diamètre / Hauteur).

Les principaux résultats de l'étude sont :

- Avant effondrement, les distances d'effets thermiques associées à l'incendie d'un silo quelconque sont inférieures à 5 m à partir de la paroi extérieure du silo pour les effets irréversibles et 2 m pour les effets létaux. L'utilisation de distances d'effets thermiques avant effondrement du silo nécessite que l'exploitant justifie que le silo ne s'effondrera pas en cas d'incendie compte tenu de moyens techniques ou de mesures de conception. Dans le cas de silos en béton, il pourra être démontré que l'agression thermique liée à l'inflammation des pellets de bois n'est pas suffisante pour impacter la tenue mécanique de la structure béton. Dans tous les cas, une justification précise devra être apportée ;
- Après effondrement : l'incendie d'un silo peut conduire à l'effondrement de ses parois qui provoque un épandage de matière sur une surface importante, ce qui augmente, par conséquent, les distances d'effet de l'incendie.
 - les incendies des silos verticaux de mêmes volumes présentent des distances d'effets similaires quel que soit le ratio. Pour les plus gros silos de 5 000 m³, les distances aux effets irréversibles atteignent 35 m à partir du centre du silo et les distances aux effets létaux atteignent 31 m ;
 - Pour les plus gros silos de 5 000 m³, les incendies des silos plats présentent des distances d'effets au seuil d'effets irréversibles variant de 30 m de 10 à 40 m pour un ratio D/h de 2. Les effets létaux atteignent respectivement 27 m et 30 m ;
 - Dans le cas d'un silo vertical (métallique ou en béton) dont l'incendie conduit à l'effondrement, les dimensions du silo n'interviennent pas et le paramètre prépondérant est le volume : plus le volume est important, plus le diamètre du talus formé augmente et donc plus les distances d'effet sont importantes ;
 - Dans le cas d'un silo plat (en béton) dont l'incendie conduit à l'effondrement, plus le diamètre augmente par rapport à sa hauteur, plus les distances d'effet sont importantes ;
 - Dans le cas d'un silo plat métallique, plus la pression de rupture de la surface soufflable augmente, plus les distances d'effet sont importantes : lorsque la pression de rupture de la surface soufflable passe de 60 à 100 mbar, pour un volume donné, les distances d'effet doublent.

5.5.2 EXPLOSION DE SILOS

Les effets de surpression associés à l'explosion de silos ont été évalués. Les différents silos considérés dans l'étude sont les silos plats et verticaux, en acier ou en béton. Plusieurs tailles de silos sont considérées, au moyen de leur volume et du ratio D/h (Diamètre / Hauteur). Les principaux résultats de l'étude sont :

- Dans le cas d'un silo vertical (métallique ou en béton) :
 - Pour un volume donné, plus le ratio D/h augmente, plus les distances d'effet sont importantes ;
 - Pour un ratio D/h donné, plus le volume augmente, plus les distances d'effet sont importantes ;
 - Dans le cas de silo métallique, la pression de rupture de la surface soufflable est plus faible que pour un silo en béton et les distances d'effets à volume donné et ratio D/h donné sont plus faibles ;
- Dans le cas d'un silo plat métallique, plus la pression de rupture de la surface soufflable augmente, plus les distances d'effet sont importantes : lorsque la pression de rupture de la surface soufflable passe de 60 à 100 mbars, pour un volume donné, les distances d'effet doublent.

5.5.3 EXPLOSION DE LA CHAMBRE DE COMBUSTION D'UNE CHAUDIERE

Les effets de surpression associés à l'explosion de la chambre de combustion ont été évaluées dans le cas des chaudières à tubes d'eau (TE) et des chaudières à tubes de fumées (TF). Les principaux résultats de l'étude avec les hypothèses retenues sont :

- Pour les chaudières à TE dont le volume de chambre de combustion varie de 10 à 150 m³, les effets irréversibles varient de 30 à 80 m et les effets létaux significatifs de 10 à 25 m environ ;
- Pour les chaudières à TF dont le volume de chambre de combustion varie de 5 à 40 m³, les effets irréversibles varient de 25 à 50 m et les effets létaux significatifs de 10 à 20 m environ.

5.5.4 BLEVE DE LA CAPACITE D'EAU D'UNE CHAUDIERE

Les effets de suppression dues à un BLEVE d'un ballon d'eau ont été évaluées pour des ballons dont le volume varie de 5 à 250 m³, avec des pressions de rupture de ces capacités comprises entre 10 et 30 bars.

Les principaux résultats de l'étude avec les hypothèses retenues sont :

- Pour une pression de rupture moyenne de 20 bars, avec la capacité du ballon variant de 5 à 250 m³, les effets irréversibles varient de 30 à 120 m et les effets létaux significatifs de 10 à 40 m environ ;
- Pour chaque seuil d'effet (SEI, SEL, SELS), plus le volume du ballon d'eau est petit, plus l'écart entre les distances d'effet obtenues pour les 3 pressions de rupture se réduit.

Par exemple, pour les effets irréversibles et pour un volume du ballon d'eau de 5 m³, l'écart entre les distances d'effet obtenues pour une pression de rupture du ballon variant de 10 à 30 bars est de 12 m environ ; cet écart est de 40 m pour un volume du ballon d'eau de 250 m³.

6 ELEMENTS POUR LA CARACTERISATION DES PROBABILITES

Ce chapitre explicite la méthode utilisée pour évaluer la probabilité d'occurrence des phénomènes dangereux et des accidents majeurs identifiés dans les chapitres précédents.

6.1 PRESENTATION DES METHODOLOGIES DE CARACTERISATION DE LA PROBABILITE

Dans le cadre d'une EDD, les phénomènes dangereux et accidents sont quantifiés en classe de probabilité conformément à l'Annexe 1 (relative aux échelles de probabilité) de l'arrêté PCIG du 29 septembre 2005. Ces classes sont présentées dans le tableau suivant :

Echelle de probabilité	E	D	C	B	A
Qualitative (si le REX est suffisant)	« événement possible mais non rencontré au niveau mondial » : n'est pas impossible au vu des connaissances actuelles	« événement très improbable » : s'est déjà produit mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement la probabilité de ce scénario	« événement improbable » : un événement similaire déjà rencontré dans le secteur d'activité ou dans ce type d'organisation au niveau mondial, sans que les éventuelles corrections intervenues depuis apportent une garantie de réduction significative de sa probabilité	« événement probable sur site » : s'est produit et/ou peut se produire pendant la durée de vie des installations	« événement courant » : se produit sur le site considéré et/ou peut se produire à plusieurs reprises pendant la durée de vie des installations, malgré d'éventuelles mesures correctives
Semi-quantitative	Cette échelle est intermédiaire entre les échelles qualitative et quantitative, et permet de tenir compte de la cotation des mesures de maîtrise des risques mises en place				
Quantitative (par unité et par an)		10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²

Tableau 18: Classes de probabilité (Annexe 1 de l'Arrêté du 29 septembre 2005)

L'estimation semi-quantitative de la probabilité d'occurrence d'un phénomène dangereux se décompose en trois étapes principales :

- Étape 1 : Choix d'une méthode d'estimation de la probabilité ;
- Étape 2 : Collecte des données d'entrées nécessaires à l'estimation ;
- Étape 3 : Agrégation des données le long du nœud papillon et affectation d'une classe de probabilité d'occurrence pour l'accident potentiel ou le phénomène dangereux conformément à l'échelle présentée ci-dessus.

6.1.1 ÉTAPE 1 : CHOIX D'UNE METHODE D'ESTIMATION DE LA PROBABILITE

La probabilité d'occurrence d'un accident peut être estimée par plusieurs méthodes.

La première méthode consiste à évaluer la probabilité d'occurrence des phénomènes dangereux à partir des événements initiateurs (EI) en utilisant des bases de données publiques ou bien des données de retour d'expérience de l'exploitant. C'est l'approche la plus complète qui permet, pour une installation particulière, de prendre en compte des éléments spécifiques dans l'estimation de la probabilité.

Mais cette approche est également la plus longue et elle peut être source d'estimation erronée. En effet, les fréquences retenues pour chaque événement initiateur ainsi que les probabilités de défaillance des barrières de sécurité peuvent être estimées de façon pénalisante. De plus, dans le cas où des données de retour d'expérience sont utilisées, celles-ci peuvent être de moindre qualité.

La deuxième méthode consiste à évaluer la probabilité d'occurrence à partir des ERC. C'est une approche simplifiée et plus rapide. Elle est applicable par exemple lorsque l'installation est répandue dans l'industrie dans des configurations similaires. Basée sur un retour d'expérience, elle permet a priori de bien apprécier la fréquence d'occurrence d'un ERC. Il est important de préciser que les fréquences affichées dans la littérature prennent en compte la présence de barrières de sécurité génériques que l'exploitant se doit d'identifier. L'utilisation de ces fréquences sous-entend que l'exploitant a évalué de façon qualitative le niveau de performance des barrières de sécurité concernées et s'est assuré de leur suivi (notamment au travers d'une politique de tests et de maintenance).

Cette méthode présente l'inconvénient de ne pas prendre en compte la spécificité d'une installation (par exemple, présence de barrières supplémentaires ou façon d'opérer différente) et n'intègre pas les évolutions potentielles dans le temps (vieillesse des installations par exemple).

Une autre méthode consiste à évaluer la probabilité d'occurrence à partir du phénomène dangereux. Cette approche peut uniquement être utilisée lorsque les installations sont considérées comme identiques et que les données disponibles sont jugées fiables. C'est le cas notamment pour les dépôts de liquides inflammables (DLI). On retrouve globalement les mêmes avantages et mêmes critiques que pour la méthode précédente.

Remarque :

Pour quantifier la probabilité des événements initiateurs ayant souvent des fréquences d'occurrence annuelles importantes, une échelle de classe de fréquences est proposée ci-après.

Classes de probabilité	E	D	C	B	A	-	-
Classes de fréquence	≤ F5	F4	F3	F2	F1	F0	F-1
Fréquence / an	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	1	

Tableau 19: Classes de fréquence

6.1.2 ÉTAPE 2 : COLLECTE DES DONNEES D'ENTREES NECESSAIRES A L'ESTIMATION DE LA PROBABILITE

L'estimation de la probabilité d'occurrence d'un phénomène dangereux nécessitent de disposer des fréquences d'occurrence des EI ou des ERC (par exemple : nombre de fois dans l'année où la biomasse livrée ne respecte pas les critères d'humidité ou de granulométrie, la fréquence d'occurrence annuelle de rupture d'un convoyeur, etc.), ou de probabilité d'occurrence conditionnelle des événements secondaires (par exemple : la probabilité de présence d'une source d'inflammation d'énergie suffisante, sachant qu'il y a formation d'une atmosphère explosive). Ces données doivent également être complétées par le niveau de confiance des barrières de sécurité, qui reflète un facteur de réduction des risques, soit directement exprimé en une valeur soit reflété par une probabilité de défaillance à la sollicitation. L'exploitant devra compléter l'évaluation de la performance des barrières de sécurité pour en déterminer un niveau de confiance, en s'appuyant sur les référentiels Oméga 10 et Oméga 20 de l'INERIS.

Le paragraphe 6.2 fournit des données collectées dans la littérature, sur :

- les fréquences de défaillances de certains équipements ;
- les fréquences d'inflammation de poussières combustibles ;
- la probabilité d'occurrence d'une explosion de poussières ou d'un incendie de silo.

6.1.3 ÉTAPE 3 : AGREGATION DES DONNEES LE LONG DU NŒUD PAPILLON ET AFFECTATION D'UNE CLASSE DE PROBABILITE D'OCCURRENCE

Les règles d'agrégation des fréquences le long du nœud papillon et d'attribution d'une classe de probabilité d'occurrence annuelle des phénomènes dangereux sont traitées en détail dans le rapport Oméga 25 de l'INERIS « Agrégation semi-quantitative des probabilités dans les études de dangers des installations classées », daté du 23/12/2015.

6.2 DONNEES UTILISABLES DANS LE CAS DES CHAUFFERIES A BIOMASSE

Dans le cadre de ce guide, des données concernant certains événements initiateurs, événements redoutés centraux et phénomènes dangereux sont fournies dans les paragraphes suivants et en annexe I afin de remplir l'étape 2 décrite précédemment. Elles proviennent de bases de données adaptées. L'exploitant est laissé libre de les utiliser ou de valoriser des éléments spécifiques à son installation.

6.2.1 FREQUENCES DE CERTAINS EI / ERC / PHD PROPRES AUX SILOS

6.2.1.1 PROBABILITE D'OCCURRENCE D'UNE EXPLOSION DANS UN SILO ET ELEMENTS POUR LES ESPACES BATIMENTAIRES

Le rapport d'étude « Proposition d'une méthode semi-quantitative d'évaluation des probabilités d'inflammation » [3] présente une approche d'évaluation semi-quantitative des probabilités d'inflammation et des fréquences d'occurrence des phénomènes dangereux de type explosion en fonction de la substance et du type de zone rencontrée.

Selon ce rapport, **il n'existe pas de base de données relative aux fréquences d'inflammation des poussières combustibles.**

Pour mémoire, il est excessivement difficile d'obtenir une probabilité d'inflammation des poussières en agrégeant les fréquences d'occurrence de toutes les causes d'inflammation et les probabilités de défaillance des barrières de sécurité associées (on a notamment des difficultés à traiter correctement les problématiques liées à l'interdiction de fumer, aux permis de travaux par point chaud, ...).

La littérature peut toutefois fournir des données (comme par exemple « Guidelines for combustible dust hazards analysis » du CCPS).

Il est toutefois rappelé que des mesures telles que la prévention contre la foudre, les mises à la terre, la présence d'un arrête-flamme, une procédure de travaux par points chauds, etc. permettent de réduire la fréquence d'apparition des sources d'inflammation dans un nuage de poussières susceptible de se former.

L'explosion se produit en cas de mise en suspension de poussières inflammables (de granulométrie suffisamment fine) et de présence d'une source d'inflammation.

Selon le rapport d'étude INERIS [3], il est possible, pour déterminer d'une manière globale la probabilité d'occurrence d'une inflammation d'un nuage de poussières (explosion de poussières) dans un silo, de se référer au retour d'expérience indiqué dans le guide silos (version 2008). **Le guide de l'état de l'art sur les silos indique que la fréquence d'une explosion primaire en cellule varie de C à E, avec une valeur usuelle de D dans l'état actuel des silos et en tenant compte de la mise en place de mesures compensatoires correspondant à l'état de l'art.**

Plusieurs points importants sont à prendre en compte pour la cotation de la probabilité d'une explosion primaire ou secondaire d'un nuage de poussières combustibles dans un silo :

- la fréquence d'explosion de poussières dépend en pratique de la fréquence de mise en suspension. Les équipements disposant de système de dépoussiérage en continu avec mise en suspension occasionnelle ou accidentelle seront moins sujets à une explosion que ceux dépourvus de ce dispositif de sécurité dans lesquels les poussières sont mises en suspension en fonctionnement normal.
- une majorité des explosions de poussières dans le domaine de l'agroalimentaire se seraient produites dans des élévateurs. En Allemagne, comme aux Etats-Unis, les élévateurs sont les équipements les plus impliqués (27 %). Les "silos" (capacités de stockage) représenteraient 21 % des cas, les broyeurs 19 % et les séchoirs 10%. Pour cette raison, la probabilité d'explosion dans un volume contenant un élévateur à godets serait plus importante que celle contenant des transporteurs à bande ou des redler. Aussi, la probabilité d'explosion d'un silo alimenté directement par un élévateur serait plus importante que celle d'un silo alimenté par un autre type de convoyeur.
- une procédure assurant un taux de rotation des combustibles qui permet de limiter l'auto-échauffement n'est pas considérée comme une barrière mais permettrait de réduire la fréquence de ce phénomène.

Sur la base de ces éléments, **les valeurs de probabilité suivantes d'une explosion de poussières pour les silos en conformité avec l'état de l'art sur les silos [4] et munis de l'ensemble des barrières performantes présentées dans le § 4.4.2 peuvent être proposés par défaut :**

- C pour les explosions primaires de cellules de stockage quand elles ne sont pas alimentées directement par des élévateurs à godets (c'est-à-dire que l'élévateur se déverse dans un volume différent de celui de la cellule et que les systèmes d'aspiration ne sont pas communs) ;
- B pour les explosions primaires de cellules de stockage quand elles sont alimentées directement par des élévateurs à godets, quand l'élévateur se déverse sur un transporteur dans la cellule ou quand le système d'aspiration des poussières de l'élévateur est relié au système d'aspiration en cellule.

En complément, pour les espaces bâtimentaires, il est précisé que :

- un espace bâtimentaire qui abrite des équipements non capotés serait sujet à plus de dépôt de poussières qu'un bâtiment qui renferme des équipements capotés et étanches ;
- la mise en œuvre d'une procédure de nettoyage régulière des espaces bâtimentaires permet de décaler la probabilité de la propagation d'une explosion primaire.

Ainsi, bien que les intensités des phénomènes dangereux relatifs aux espaces bâtimentaires n'aient pas été réalisées dans le cadre de ce rapport, les principes suivants pour caractériser la probabilité des explosions de poussières dans ces espaces peuvent être proposés par défaut :

- B pour des explosions primaires dans des espaces bâtimentaires isolés, non nettoyés présentant au moins un équipement pouvant être à l'origine d'explosion primaire (broyeurs, convoyeurs...) ;
- C pour des explosions primaires dans des espaces bâtimentaires isolés, régulièrement nettoyés, présentant des équipements non capotés, non aspirés ou des équipements présentant des risques d'émissions de poussières tels que broyeurs, élévateurs, trieurs ou tamis (y compris les espaces abritant les têtes d'autres transporteurs qui sont alimentées par un élévateur) ;
- D pour des explosions primaires dans des espaces bâtimentaires isolés, régulièrement nettoyés, présentant des équipements aspirés et capotés ou autres que ceux cités précédemment (convoyeurs) ;
- C, D ou E (selon les cas décrits ci-avant) dans le cas de la propagation d'explosions primaires vers un espace bâtimentaire communicant et faisant l'objet d'un nettoyage ;
- B, C ou D (selon les cas décrits ci-avant) dans le cas de la propagation d'explosions primaires vers un espace bâtimentaire communicant en l'absence de nettoyage de cet espace bâtimentaire.

Ces principes pourront être adaptés au cas par cas selon les équipements et les espaces bâtimentaires.

Ces principes sont applicables dès lors que les mesures correspondant à l'état de l'art sont appliquées (ex. détecteur de bourrage, détecteur de déport de bandes, etc.) ; dans le cas contraire, les probabilités peuvent être dégradées.

Note :

Une explosion dans un silo peut aussi résulter de l'inflammation d'une ATEX gazeuse formée par des gaz de pyrolyse qui produiraient un auto-échauffement dans un dépôt de produits pulvérulents. Toutefois, le rapport INERIS [3] indique que la probabilité d'occurrence d'une telle explosion étant plus faible que celle d'une explosion de poussières classique, on se limite dans les EDD à cette dernière.

6.2.1.2 PROBABILITE D'OCCURRENCE D'UN INCENDIE DANS UN SILO

L'incendie dans le silo se déclare en cas d'inflammation du combustible présent en permanence dans le silo par une source d'inflammation d'énergie suffisante ou en cas d'auto-échauffement non maîtrisé.

Il n'existe pas de données dans la littérature pour évaluer la fréquence d'occurrence d'un incendie dans un silo de stockage. **Cependant, par défaut la probabilité d'un incendie de stockage de biomasse peut être prise à B** en tenant compte de la mise en place de mesures compensatoires correspondant à l'état de l'art (mesure de la température du stockage, contrôle de la qualité de la biomasse à l'arrivée, procédure de gestion des travaux par points chauds, mesures de protection contre la foudre, etc.). Cette probabilité pourra être décotée sur la base d'éléments justificatifs suffisants si :

- Les conditions de stockage en fonctionnement normal et dégradé permettent un taux de rotation suffisamment élevé pour ne pas être concerné par les phénomènes d'auto-échauffement. A titre indicatif, on peut indiquer que les phénomènes de fermentation produisant un auto-échauffement peuvent se développer en 3 à 4 jours et l'auto-inflammation sous des délais de l'ordre de 4 à 5 jours, soit un délai total de 7 à 9 jours¹¹ (d'après le guide silo).
- L'évolution de la température du silo est surveillée, pour détecter et maîtriser le risque d'auto-échauffement. Le suivi de la température du stockage avec une fréquence au moins hebdomadaire en situation normale et plus importante en cas de temps de séjour prolongé de la biomasse. La mesure de température doit être réalisée au sein de la biomasse.
- Un système d'aspersion d'eau correctement dimensionné et déclenché sur une détection incendie automatique permet de réduire l'occurrence d'un incendie.

6.2.2 FREQUENCES DE CERTAINS EI / ERC / PHD PROPRES AUX CHAUDIERES

Ces données d'entrée peuvent être évaluées de plusieurs manières. Si elles sont disponibles et adaptées au cas d'étude, des données de retour d'expérience peuvent être utilisées (non couvert dans le cadre de ce guide). Dans le cas contraire, des données provenant de bases de données publiques devront être employées.

L'Annexe I de ce guide fournit des données concernant certains événements initiateurs, événements redoutés centraux et phénomènes dangereux pour les équipements suivants :

- Capacités sous pression ;
- Échangeurs tubulaires ;

Note : Les bases de données publiques ne faisant pas spécifiquement référence aux équipements types chaudières, celles-ci peuvent être assimilées à ce type d'équipements.

7 CARACTERISATION DE LA CINETIQUE DES EVENEMENTS

D'après la circulaire du 10 mai 2010¹⁵ et en application des articles 5 à 8 de l'arrêté du 29 septembre 2005¹⁶, la cinétique est la vitesse d'enchaînement des événements constituant une séquence accidentelle, de l'événement initiateur aux conséquences sur les éléments vulnérables. Elle prend en compte la cinétique d'apparition et d'évolution du phénomène dangereux et celle de l'atteinte des éléments vulnérables puis de la durée de leur exposition au niveau d'intensité des effets correspondant. Ces derniers éléments de cinétique dépendent des conditions d'exposition des intérêts, et notamment de leur possibilité de fuite ou de protection. En application de l'article 8 de l'arrêté du 29 septembre 2005, la cinétique de déroulement d'un accident est qualifiée de lente si elle permet la mise en œuvre de mesures de sécurité suffisantes, dans le cadre d'un plan d'urgence externe, pour protéger les personnes exposées à l'extérieur des installations avant qu'elles ne soient atteintes par les effets du phénomène dangereux.

Dans le cadre de chaudière à biomasse, l'ensemble des phénomènes dangereux et accidents majeurs retenus dans le présent guide sont à cinétique rapide.

¹⁵Circulaire du 10/05/10 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

¹⁶ Arrêté du 29/09/05 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

8 EFFETS DOMINOS

Dans le cadre de l'étude de dangers, les phénomènes dangereux issus de l'installation de chaufferie doivent être pris en considération en tant que potentiels événements initiateurs d'un phénomène dangereux pouvant avoir lieu sur une autre installation dangereuse du site ou d'un site autre pouvant être touché par les seuils des effets dominos (pour rappel, 8 kW/m² pour les effets thermiques et 200 mbars pour les effets de surpression).

L'exploitant doit ainsi déterminer si des effets de phénomènes dangereux générés par l'installation de chaufferie (effets thermiques, de surpression, projectiles, etc.) peuvent atteindre d'autres installations potentiellement dangereuses dans le site ou hors site.

Plus de précisions sur la prise en compte des effets dominos dans les études de dangers sont données dans la circulaire du 10 mai 2010.

9 CONCLUSION

Ce guide, réalisé dans le cadre du programme d'appui technique pour la Maîtrise des risques accidentels sur les sites et territoires associés aux installations classées, vise à fournir des éléments pour faciliter la réalisation des EDD des chaufferies à combustibles solides de type biomasse ou des sites comportant ces installations, ainsi que leur instruction ou la conception de ces installations en appliquant la maîtrise du risque à la source.

Ce guide traite des chaufferies à combustibles solides de type biomasse et des installations connexes à savoir les installations de stockage de la biomasse, les installations de préparation (broyage, tamisage) et les installations de transfert (transporteurs) des combustibles de type biomasse. Les chaudières à biomasse sont visées par la rubrique 2910 de la nomenclature des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) Les silos de stockage sont, quant à eux, concernés par la rubrique 1532 quand la biomasse est de type bois ou par la rubrique 2160 pour les autres biomasses dégageant des poussières inflammables. Les installations de préparation peuvent relever de la rubrique 2260. Ces installations peuvent être classées sous le régime de l'autorisation, auquel cas elles font l'objet d'une EDD. Une situation également fréquemment rencontrée consiste en la présence de ces installations sur des établissements industriels soumis à autorisation. Les risques et effets dominos générés par les chaudières sont donc à étudier.

Les combustibles solides pouvant être utilisés dans une chaudière à biomasse sont ceux définis dans la rubrique 2910. Ils présentent un caractère combustible, sont susceptibles de générer des poussières pouvant être remises en suspension pour former des nuages de poussières inflammables et peuvent être le lieu de réactions d'auto-échauffement. Selon les équipements dans lesquels ils se trouvent, ils peuvent générer des incendies, des explosions de poussières, des explosions de CO généré par la fermentation ou par une mauvaise combustion, des explosions de gaz dans les chaudières démarrées au gaz. Dans la chaudière, un BLEVE de la capacité d'eau peut également se produire.

Les phénomènes dangereux ayant les intensités potentiellement les plus importantes ont été identifiés. Ainsi, les scénarios d'accidents majeurs d'explosion et d'incendie liés aux silos de stockage de combustible et les accidents majeurs liés à la chaudière ont été caractérisés en termes d'intensité. Les distances d'effets sont présentées en annexe de ce guide, sous forme d'abaques et en précisant les principales hypothèses de modélisation.

Les principaux résultats sont les suivants :

- Pour les silos de stockage :
 - Pour l'incendie, avant effondrement, les distances d'effets thermiques associées à l'incendie d'un silo quelconque sont inférieures à 5 m à partir de la paroi extérieure du silo pour les effets irréversibles et 2 m pour les effets létaux. Après effondrement dû à l'incendie, pour un volume de silo plat ou vertical variant de 100 à 5000 m³, les effets irréversibles varient de 10 à 40 m et les effets létaux significatifs de 10 à 30 m environ ;

- Pour l'explosion, les distances d'effets d'un silo vertical augmentent avec le volume et le ratio D/h. Dans le cas d'un silo plat métallique, plus la pression de rupture de la surface soufflable augmente, plus les distances d'effet sont importantes ;
- Pour la chaudière :
 - Pour les chaudières à TE dont le volume de chambre de combustion varie de 10 à 150 m³, les effets irréversibles varient de 30 à 80 m et les effets létaux significatifs de 10 à 25 m environ,
 - Pour les chaudières à TF dont le volume de chambre de combustion varie de 5 à 40 m³, les effets irréversibles varient de 25 à 50 m et les effets létaux significatifs de 10 à 20 m environ,
 - Pour une pression de rupture moyenne de 20 bars, avec la capacité du ballon variant de 5 à 250 m³, les effets irréversibles varient de 30 à 120 m et les effets létaux significatifs de 10 à 40 m environ ,
 - Pour chaque seuil d'effet (SEI, SEL, SELS), plus le volume du ballon d'eau est petit, plus l'écart entre les distances d'effet obtenues pour les 3 pressions de rupture se réduit.

Enfin, des éléments pour l'évaluation de la probabilité de ces phénomènes sont rappelés dans ce guide.

10 ABREVIATIONS

A	Autorisation
AM	Arrêté ministériel
APR	Analyse Préliminaire des Risques
ARIA	Analyse, Recherche et Information sur les Accidents
ATEX	ATmospheres EXplosibles
BARPI	Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industriels, au MEDDE
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion
C	Cinétique
CEE	Communauté Économique Européenne
CIBE	Comité Interprofessionnel du Bois-Energie
CLP	Règlement n° CE 1272/2008 relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage (CLP)
CCPS	Center for Chemical Process Safety
DREAL	Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
ED	Effets dominos
EDD	Étude de dangers
EI	Évènement initiateur
EMI	Energie minimale d'inflammation
ERC	Évènement redouté central
G	Gravité
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié
IARA	Unité Identification et Analyse des Risques Accidentels, à la Direction des Risques Accidentels de l'INERIS

I	Intensité
ICPE	Installation Classée pour la Protection de l'Environnement
IED	Directive relative aux Émissions Industrielles
MMR	Mesures de Maîtrise des Risques
LOPA	Layer Of Protection Analysis
MTD	Meilleures Techniques Disponibles
P	Probabilité
PhD	Phénomène dangereux
REX	Retour d'expérience
SEI	Seuil d'Effets Irréversibles
SEL	Seuil d'Effets Létaux
SELS	Seuil d'Effets Létaux Significatifs
SER	Seuil d'Effets Réversibles
TE	(Chaudière à) Tubes d'Eau
TF	(Chaudière à) Tubes de Fumées
UVCE	Unconfined Vapour Cloud Explosion
VCE	Vapour Cloud Explosion

11 REFERENCES

- [1] Guide pour la prise en compte des chaudières industrielles dans la rédaction d'une étude de dangers référencé - DRA71 – opération A2 de décembre 2016 référencé INERIS-DRA-14-141532-12702A
https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/DRA-14-141532-12702A-guide%20EDD-chaudi%C3%A8res_VF_0.pdf
- [2] Guide Oméga 11 - Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels (DRA 35 - rapport Q11 INERIS-DRA-2005-46055) - Connaissance des phénomènes d'auto-échauffement des solides combustibles
<http://www.ineris.fr/centredoc/omega11web.pdf>
- [3] Rapport d'étude INERIS-DRA-13-133211-12545A Proposition d'une méthode semi-quantitative d'évaluation des probabilités d'inflammation du 22/06/2015
<https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/dra-13-133211-12545a-evaluation-des-proba-dinflammation-v8-1442302458.pdf>
- [4] Guide de l'état de l'art sur les silos pour l'application de l'arrêté ministériel relatif aux risques présentés par les silos et les installations de stockage de céréales, de grains, de produits alimentaires ou de tout autre produit organique dégageant des poussières inflammables – version 3 de 2008
- [5] La note IR_2017.03_boissilos de la DGPR sur le classement de bois, en rubrique 1532
https://aida.ineris.fr/consultation_document/sites/default/files/gesdoc/95731/IR_170303%20stockage%20bois%20en%20silo_p.pdf
- [6] <http://www.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/passer-a-l'action/produire-chaleur/dossier/bois-biomasse/technologies-installations-secteurs-collectifertiaire-industriel>
- [7] Guide ADEME « Mise en place d'une chaufferie biomasse : étude et installation d'une unité à alimentation automatique »
- [8] https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/20150504_FLASH_SILODEBOIS.pdf

12 LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe A	Description des installations des chaufferies à biomasse et potentiels de dangers associés	22
Annexe B	Combustibles solides de type biomasse : définition, exemples, caractéristiques et risques	19
Annexe C	Accidentologie des installations de chaufferie à biomasse y compris les installations de stockage et de convoyage	23
Annexe D	Tableau générique d'analyse de risque	5 (A3)
Annexe E	Mode d'exploitation des chaufferies : prescriptions générales de sécurité (norme NF EN 32-020-1)	7
Annexe F	Référentiels relatifs aux barrières sur les silos et sur les chaudières	5
Annexe G	Bonnes pratiques et prescriptions visant à réduire l'empoussièremement des installations et les risques d'explosion et d'incendie des équipements de transfert	4
Annexe H	Caractérisation de l'intensité des scénarios relatifs aux chaufferies à biomasse	33
Annexe I	Éléments de probabilité des phénomènes dangereux relatifs aux chaufferies à biomasse	3

Annexe A

Description des installations des chaufferies à biomasse et potentiels de dangers associés

1 INTRODUCTION

La production et le transport de chaleur est un élément important du fonctionnement de nombreux procédés industriels.

La combustion est souvent le moyen le plus économique pour générer de la chaleur. Elle peut être réalisée avec des combustibles divers solides, liquides ou gazeux, en utilisant de l'air en convection naturelle ou forcée, ou plus rarement de l'oxygène. Cette combustion peut être réalisée dans différents types d'appareils tels une chaudière à eau chaude (type chaudière gaz de maison individuelle), une chaudière à vapeur (distribution de cette vapeur vers les utilisateurs par réseaux de tuyauteries), ou des fours permettant de chauffer directement le produit concerné (alimentation d'un réacteur par exemple, charge d'une colonne...).

Dans le cas de chaudières à combustibles solides, le combustible est stocké dans des silos puis il est repris et acheminé jusque dans le foyer de la chaudière.

La chaudière est généralement allumée avec du gaz. Puis, le combustible solide introduit dans le foyer s'enflamme. Les fumées issues de la combustion sont dépoussiérées via un système de filtration. Quand la combustion est terminée, les cendres sont récupérées et évacuées.

2 APPROVISIONNEMENT ET STOCKAGE DU COMBUSTIBLE SOLIDE

Le combustible qui alimente la chaudière est stocké dans des silos de type enterrés, cylindriques ou de plain-pied, verticaux métalliques, verticaux béton, plats bétons, plats métalliques, voire dans des hangars.

Selon l'arrêté du 29 mars 2004 modifié relatif à la prévention des risques présentés par les silos de céréales, de grains, de produits alimentaires ou de tout autre produit organique dégageant des poussières inflammables, on définit :

- « silo plat » comme « un silo dont les capacités de stockage ont une hauteur des parois latérales retenant les produits inférieure ou égale à 10 mètres au-dessus du sol » ;
- « silo vertical » comme « un silo dont les capacités de stockage ont une hauteur des parois latérales retenant les produits supérieure à 10 mètres au-dessus du sol ».

Le combustible livré par camion est déchargé de manière gravitaire ou par des pompes.

Dans le cas de silos plats, le combustible est transporté soit par un chouleur, soit par une sauterelle depuis une trémie réceptacle de livraison.

Dans le cas de silos hors sol, le combustible livré sur une aire de livraison est ensuite transporté vers le local de stockage par une vis sans fin ou un convoyeur. Des chouleurs et des grapins sont dans ce cas utilisés.

Le volume des silos est en général déterminé en tenant compte :

- des volumes de livraison standard des camions,
- de la durée d'autonomie souhaitée,
- du coût de la construction,
- du ratio volume utile / volume réel du silo.

Les combustibles peuvent nécessiter des opérations de préparation avant d'être utilisés. Ces opérations sont généralement réalisées en amont du stockage. Ces opérations sont essentiellement les suivantes :

- le tri/séparation : un capteur de métaux peut être utilisé pour éviter la présence de métaux ;
- le broyage,
- le criblage (élimination des morceaux grossiers), le tamisage et le dépoussiérage (élimination des particules trop fines). Les fosses de réception peuvent être munies de grilles de séparation dans le cas de fosses enterrées ;
- la sélection avec des sélecteurs avec table vibrante ou des sélecteur à air.

Après le stockage, les installations de transfert sont généralement les suivantes :

- Élévateur à godets,
- Transporteur à bandes ou à chaînes (métalliques),
- Transporteur à vis (vis élévatrice pouvant être fixe ou mobile),
- Transporteur pneumatique.

Dans le cas de silos plats, la vidange du silo s'effectue soit par un chouleur/tracteur qui dépose le combustible sur un dispositif de transfert, soit par un transporteur à vis dans le fond du silo.

3 ALIMENTATION EN COMBUSTIBLE SOLIDE

Le combustible solide est acheminé des silos de stockage vers le foyer en 3 étapes généralement :

- dessilage (extraction du combustible jusqu'au convoyeur par des systèmes de vis, par un plateau dessilleur muni de pales rotatives ou par un fond racleur constitué d'échelles ayant un fonctionnement de va-et-vient pour ramener le bois vers un système de convoyage),
- convoyage (par vis sans fin, par racleurs, par bande transporteuse ou pneumatique selon la gamme de puissance et le type de combustible),
- introduction dans le foyer (par vis ou par poussoir).

Une trémie d'alimentation permet ensuite d'alimenter la chaudière.

5 SYSTÈME D'ABATTAGE DES POUSSIÈRES OU DE DÉPOUSSIÉRAGE

Un dépoussiérage en continu est nécessaire lors des phases de manutention des combustibles pour limiter les émissions de poussières à l'intérieur des bâtiments et réduire les risques d'explosion dans les équipements. Celui-ci est réalisé par abattage des poussières (exemple : brumisation) ou par un système d'aspiration couplé à un dépoussiérage permettant d'aspirer l'air aux points les plus empoussiérés et de capter les poussières.

Pour améliorer l'efficacité de l'aspiration et de la captation des poussières, un capotage le plus étanche possible autour de la source d'émission est essentiel.

Les appareils de dépoussiérage les plus couramment utilisés sont les dépoussiéreurs électrostatiques, les cyclones et les filtres à manches :

- Les cyclones utilisent la force centrifuge pour séparer les poussières mécaniquement. Leur efficacité dépend de la densité des poussières et de la vitesse périphérique à l'intérieur de la chambre de séparation. Ils sont adaptés pour traiter de grandes quantités d'air chargées de grosses poussières. Ils sont généralement couplés à un filtre à manche ou un électrofiltre.
- Le filtre à manches est constitué d'un caisson fermé à sa base par une trémie, dans lequel sont suspendues des manches filtrantes ouvertes à une extrémité. Les poussières sont collectées à l'intérieur des manches par accumulation et, périodiquement, les poussières doivent être séparées par un procédé de nettoyage (contre-pression, vibration ...). Le média filtrant est en général agencé en manches constituées de grandes chaussettes de tissu ou de feutre, d'une longueur variant entre 3 et 6 m et d'un diamètre de 150 mm environ. Ces manches sont en général suspendues par le haut. Ce dispositif a des performances très élevées et permet d'obtenir un seuil de rejet constant.
- Le dépoussiéreur électrostatique est un appareil qui utilise les forces électriques pour séparer les particules solides d'un gaz. Un électrofiltre contient une ligne de fils très fins devant une pile de plaques métalliques, espacées généralement d'environ 1 cm. L'air passe entre les fils, puis entre les plaques. Un courant continu à haute tension charge les fils négativement et les plaques positivement, ce qui développe une différence de potentiel d'environ 1 000 V. La matière solide se charge négativement en passant à proximité des fils : c'est une ionisation. Lorsque ces particules ionisées arrivent entre les plaques chargées positivement, elles sont attirées par elles du fait du champ électrique. Les particules adhèrent aux plaques puis tombent dans un collecteur. Le gaz traité est couramment débarrassé de 90 % à 98 % des particules solides qu'il contenait.

6 CHAUDIÈRES

6.1 DESCRIPTION D'UN GÉNÉRATEUR DE CHALEUR

La combustion de la biomasse est une réaction d'oxydation exothermique en 4 étapes : séchage (la biomasse est d'abord réchauffée et séchée), pyrolyse et gazéification (les hydrocarbures solides et gazeux sous l'action de l'air sont séparés puis la majeure partie de la masse est libérée sous forme gazeuse), oxydation des gaz (les gaz combustibles mélangés à l'air comburant secondaire sont oxydés), combustion du résidu charbonneux.

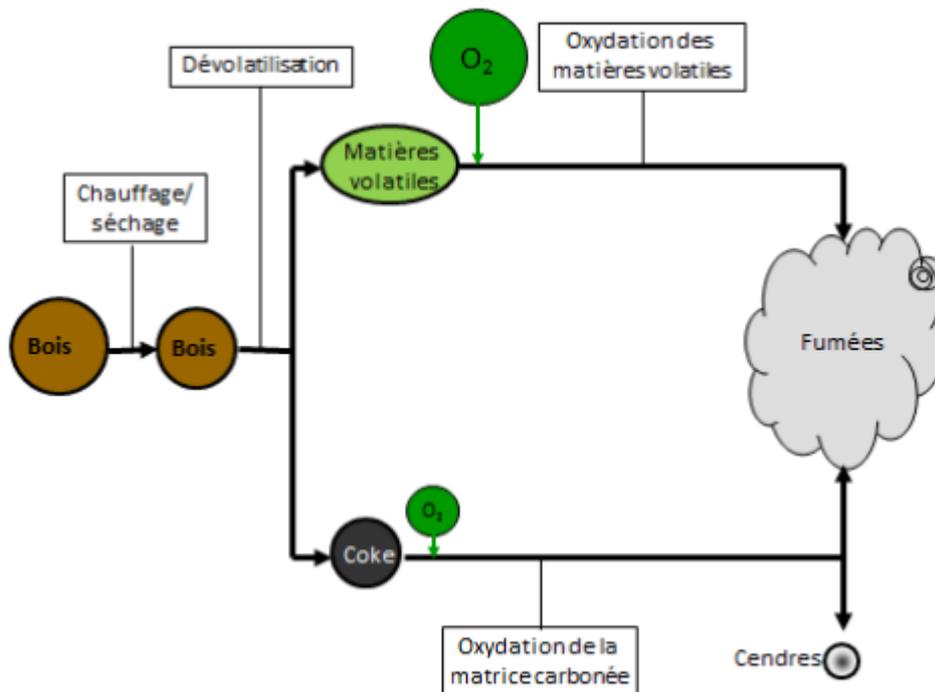


Figure 1 : Représentation schématique des processus de combustion de la biomasse (source : http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/87906_1001c0051-orenox.pdf)

Ces réactions se déroulent dans le générateur thermique composé :

- du foyer (début de flamme) où la biomasse est introduite, séchée et où sa combustion débute,
- de la chambre de combustion (développement de la flamme) où la combustion la plus complète possible des gaz du foyer a lieu afin de limiter les rejets atmosphériques,
- de l'échangeur de chaleur entre la flamme, les gaz chauds et le fluide caloporteur qui peut être de la vapeur, de l'eau chaude ou surchauffée, de l'air chaud ou de l'huile thermique.

Il existe plusieurs technologies possibles pour brûler des biomasses :

- foyer à grilles : Les grilles sont une succession de barreaux métalliques (alliage fer/carbone de qualité réfractaire) sur lesquels est déposé le combustible. Les intervalles entre chaque barreau (parfois eux-mêmes perforés) permettent la pénétration de l'air primaire ascendant au travers de la masse de combustible. On distingue :
 - foyer à grille fixe : ce type de foyer est constitué d'une grille sur laquelle le combustible est introduit et à travers laquelle l'air primaire est injecté. Les grilles fixes sont essentiellement utilisées pour les produits secs de l'industrie du bois ou pour les granulés ;
 - foyer à grille mobile : les mouvements de va et vient des grilles permettent d'étaler le lit de combustible et de biomasse. L'air primaire est injecté sous les grilles et de l'air secondaire est injecté au-dessus du lit solide, dans la flamme, pour apporter l'oxygène nécessaire à la combustion complète des gaz issus de la dégradation thermique de la biomasse.
- L'introduction de la biomasse se fait généralement par gravité ou par la technique dite de spreader stocker qui permet de projeter la biomasse pneumatiquement ou mécaniquement sur la grille de la chaudière. Cette technique permet une répartition homogène de la biomasse permettant d'assurer une combustion complète et régulière. Du fait du poids du combustible, les particules les plus fines vont se consumer avant d'atteindre la grille alors que les plus lourdes finissent de se consumer sur cette grille. La combustion s'effectue en grande partie en suspension et autorise des variations de charges importantes.
- brûleur ;
- lit fluidisé dense : le procédé consiste à injecter de l'air dans le foyer pour fluidifier les cendres et obtenir une meilleure combustion ;
- lit fluidisé circulant : le procédé consiste à injecter de l'air à haute vitesse dans le foyer pour fluidifier les cendres, l'écoulement des fumées dans le foyer doit maintenir la masse des solides en suspension et obtenir une meilleure combustion ;
- etc. ;

Il est précisé que la combustion des biomasses agricoles, qui contiennent des teneurs plus élevées en azote et en chlore que les biomasses forestières, peut poser des problèmes d'émissions corrosives sous la forme d'acides (HNO_3 , HCl) ou d'alkali se déposant sur les échangeurs de la chaudière.

L'ADEME indique que « le terme de « chaudière » est couramment utilisé à la place de celui de « générateur thermique » ; il ne s'applique qu'à l'échangeur lorsque celui-ci est distinct du foyer ».

6.2 CHAUDIÈRES À VAPEUR

Les éléments de ce paragraphe sont en grande partie issus du guide INERIS- DRA-14-141532-12702A pour la prise en compte des chaudières industrielles dans la rédaction d'une étude de dangers.

La chaleur produite par une chaudière à combustibles solides peut être transportée grâce à la vapeur d'eau jusqu'au lieu de consommation via des réseaux vapeur. On appelle cette pratique « transport par chaleur latente ». Elle consiste à produire de la **vapeur d'eau saturée** sous pression dans une ou plusieurs chaudières. Cette vapeur est amenée par des tuyauteries calorifugées sur le lieu de consommation. Elle est alors condensée dans des échangeurs, opération au cours de laquelle elle restitue sa chaleur latente de vaporisation (ainsi qu'un peu de chaleur sensible). Pour s'adapter aux différents niveaux de températures requis en différents points du procédé, une usine possède généralement plusieurs réseaux de vapeur à des pressions différentes, permettant un étalement des températures de condensation sur toute la gamme de température requise.

L'objet de ce paragraphe est de décrire le principe de fonctionnement des chaudières produisant la vapeur d'eau utilisée pour transporter la chaleur nécessaire au bon fonctionnement des procédés. On appelle chaufferie le local dans lequel se situe la chaudière ou, si la chaudière est à l'extérieur, la zone dans laquelle elle se situe.

6.2.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CHAUDIÈRE À VAPEUR

Une chaudière est un système qui utilise un combustible pour apporter de l'énergie à un fluide caloporteur et fournir ainsi un fluide avec des caractéristiques imposées par l'utilisation qui en sera faite.

L'Article R 224-20 du code de l'environnement définit une chaudière comme étant « l'ensemble corps de chaudière et brûleur s'il existe, produisant de l'eau chaude, de la vapeur d'eau, de l'eau surchauffée, ou modifiant la température d'un fluide thermique grâce à la chaleur libérée par la combustion ».

Dans le cas des chaudières à vapeur, le fluide caloporteur est de l'eau. Ce type de chaudière se compose de deux compartiments distincts : un dans lequel brûle le combustible (brûleur) et un autre dans lequel l'eau est chauffée.

Le guide couvre deux types de chaudière à vapeur, dénommées d'après le fluide qui circule à l'intérieur des tubes :

- Les chaudières à tubes de fumées, parcourus intérieurement par les gaz de combustion ;
- Les chaudières à tubes d'eau, parcourus intérieurement par l'eau et l'émulsion eau-vapeur.

Il existe une multitude de combustibles possibles pour alimenter une chaudière, chacun présentant avantages et inconvénients en termes d'émissions et de rendement principalement. On peut citer à titre d'exemple le charbon, le fioul (lourd ou domestique), le biodiesel, le gaz naturel, la biomasse.

Dans certains cas, du propane peut être utilisé lors des phases de (re)démarrage des chaudières. Il s'agit alors du combustible d'alimentation des allumeurs des brûleurs. En général, le propane est stocké sous forme liquéfiée sous pression dans des bouteilles entreposées dans un local dédié.

Quelle que soit la technologie étudiée (tubes d'eau ou tubes de fumées), le principe de fonctionnement d'une chaudière à vapeur peut être schématisé de la manière suivante :

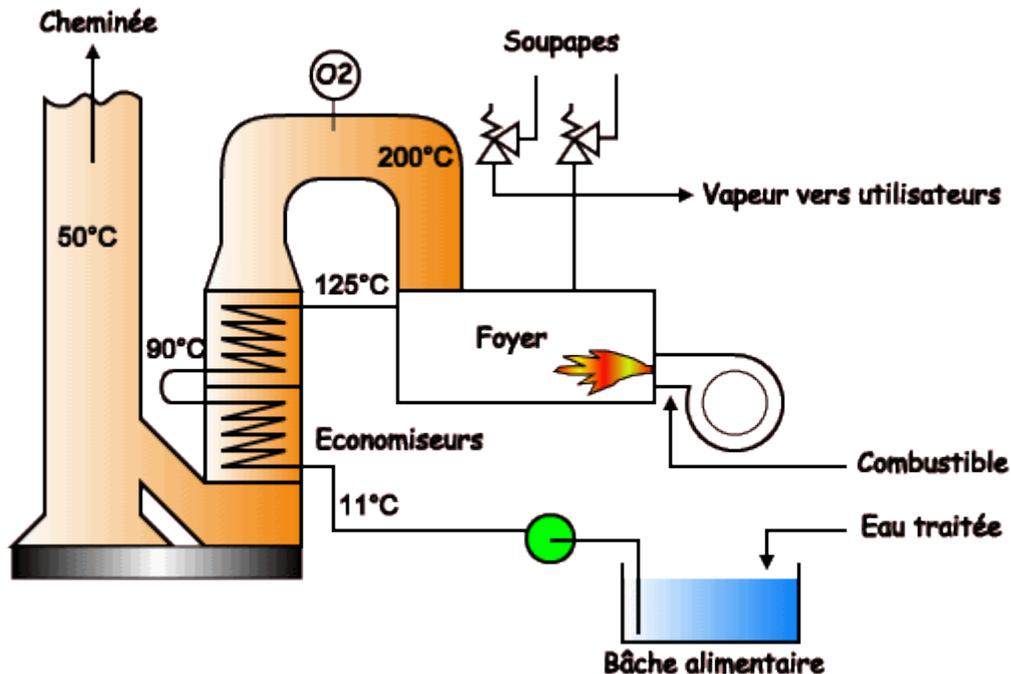


Figure 2: Schéma de principe d'une chaudière à vapeur

Source : http://www.azprocede.fr/Cours_GC/combustion_chaudiere.html

Une chaudière à vapeur est constituée des éléments suivants :

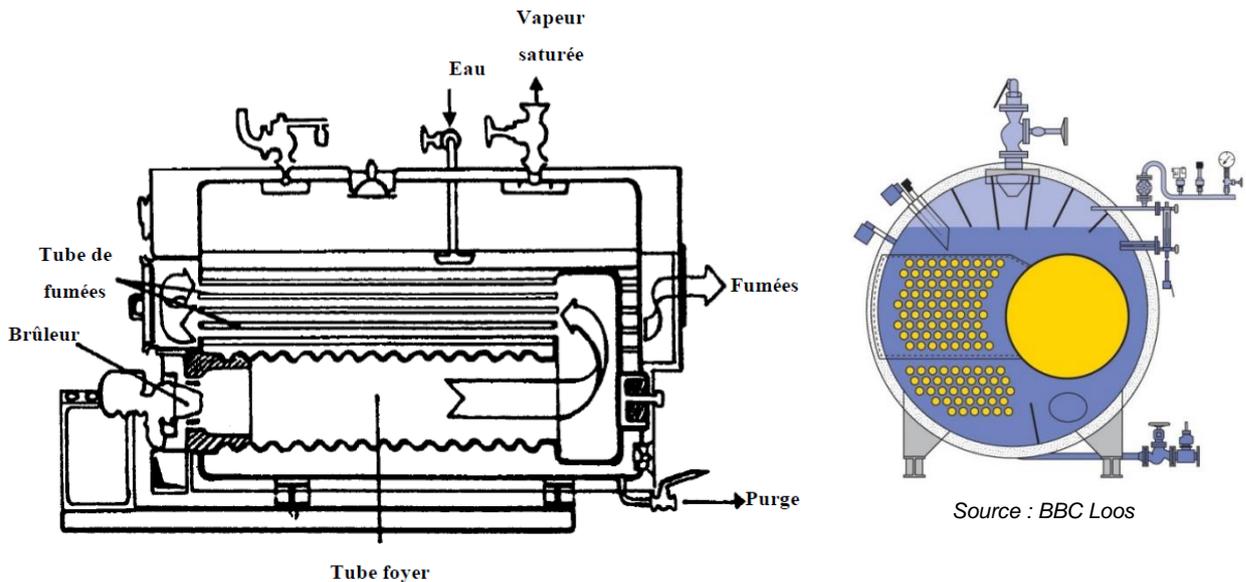
- Bâche alimentaire avec appoint d'eau traitée (décarbonatée, déminéralisée, dégazée...);
- Pompe alimentaire (dont la pression de refoulement est supérieure à la pression de la vapeur produite);
- Economiseurs (primaire et secondaire) permettant de refroidir les fumées en préchauffant l'eau d'alimentation;
- Foyer avec brûleur;
- Réseau vapeur avec soupapes de protection;
- Analyseur d'oxygène sur les fumées pour réglage de l'excès d'air;
- Cheminée pour rejet des fumées.

L'économiseur est un dispositif installé entre la chaudière et la cheminée qui permet de récupérer une partie de la chaleur des fumées pour préchauffer l'eau d'alimentation et ainsi augmenter le rendement.

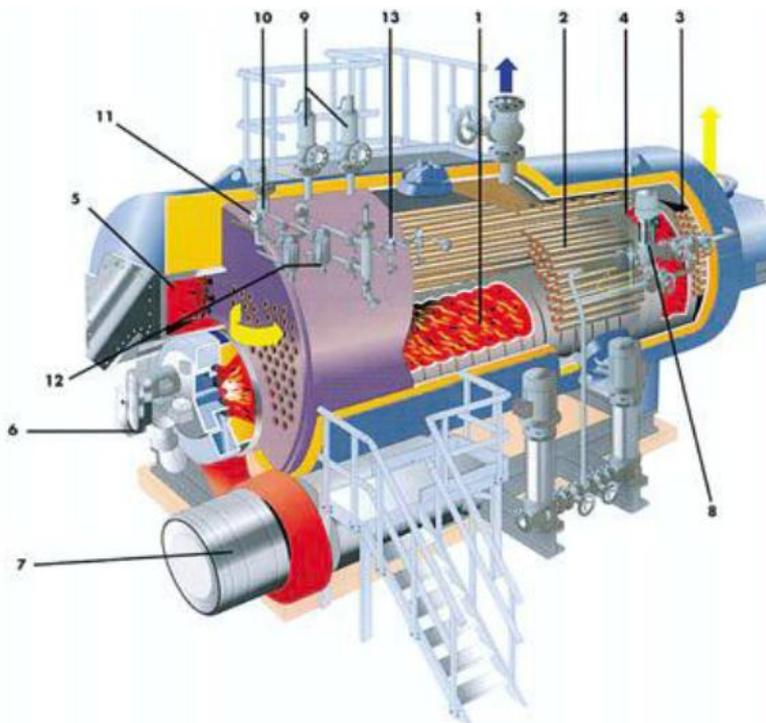
6.2.2 CHAUDIÈRES À TUBES DE FUMÉES

Dans une chaudière à tubes de fumées, les gaz de combustion circulent du brûleur jusqu'à la cheminée dans un faisceau de tubes immergés dans une calandre formant le réservoir d'eau. L'ensemble constitue le corps cylindrique de la chaudière. La principale caractéristique des chaudières de ce type est de comporter un grand volume d'eau sous pression. La gamme de puissance de ces chaudières s'étend de 0,2 à 50 t/h de vapeur saturée, ce qui correspond à des puissances thermiques de l'ordre de 100 kW à 30 MW.

Une chaudière à tubes de fumées est schématisée ci-dessous.



Source : Académie de Poitiers



1. Foyer
2. Tube de fumée 2^{ème} passe
3. Tube de fumée 3^{ème} passe
4. Boîte arrière à refroidissement par eau
5. Chambre de combustion
6. Brûleur
7. Ventilateur de combustion
8. Vanne de régulation
9. Soupape de sécurité
10. Indicateur de niveau de sécurité d'eau
11. Manomètre
12. Indicateur de niveau à glace
13. Bloc d'isolation + manomètre

Source : Académie de Poitiers

Figure 2 : Schéma de principe d'une chaudière à tubes de fumées

L'alimentation en eau est effectuée à la partie inférieure de la calandre, le faisceau tubulaire étant entièrement noyé dans l'eau liquide.

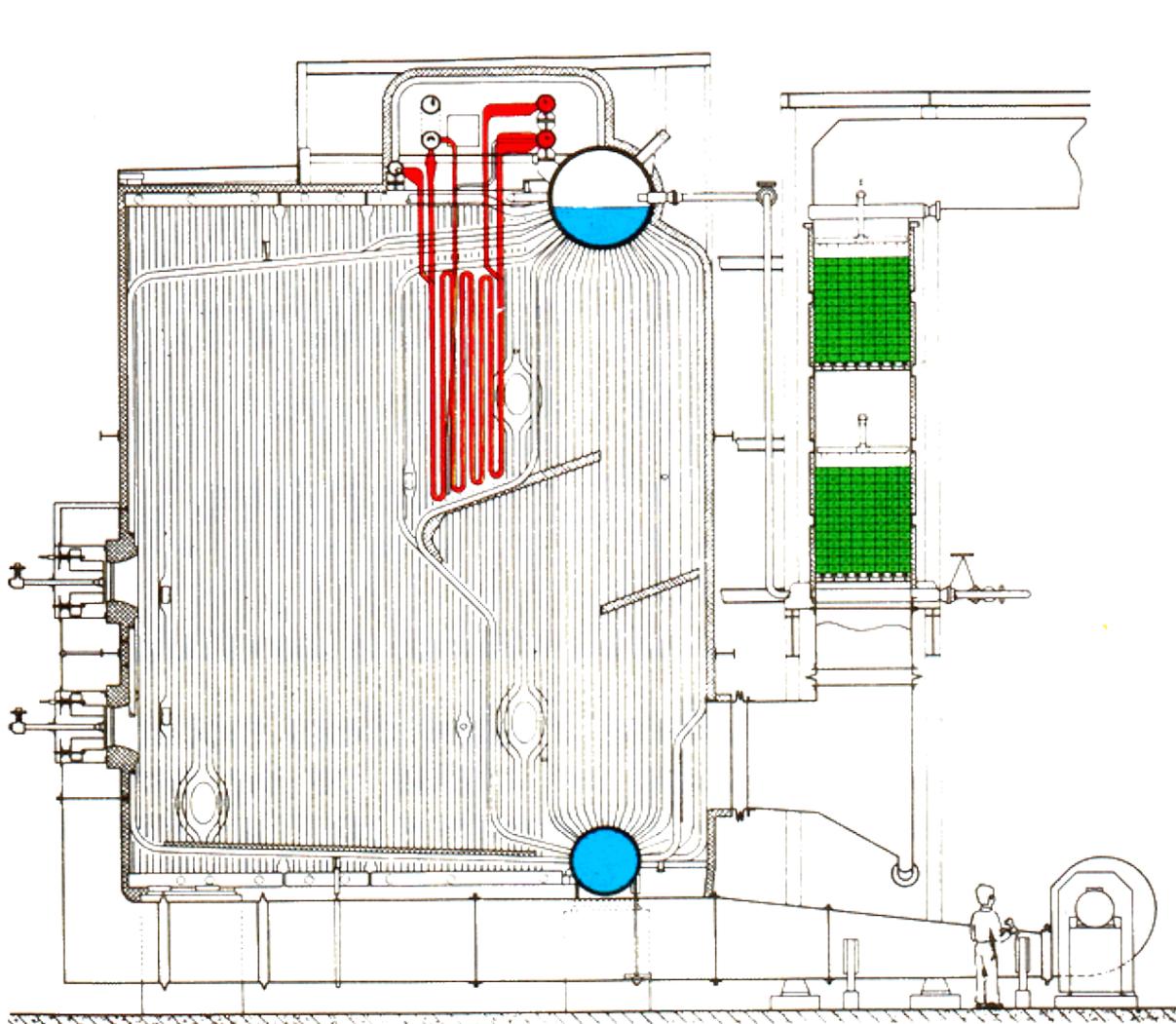
Le tube foyer, qui se trouve dans le ballon même de la chaudière, sous le plan d'eau, collecte les gaz chauds en sortie de brûleur. Les gaz chauds, accumulés dans un premier caisson à l'arrière de la chaudière, sont véhiculés par un groupe de tubes immergés dans l'eau du ballon vers un second caisson à l'avant de la chaudière. Un second groupe de tubes immergés emmène les gaz vers un troisième caisson à l'arrière de la chaudière, ce troisième caisson débouche sur la cheminée pour évacuation des fumées vers l'extérieur après passage éventuel dans un économiseur qui assure le refroidissement des fumées.

Il y a donc circulation des gaz de combustion dans des tubes assurant, par conduction vers l'eau de la calandre, la vaporisation par apport de calories.

Pour produire de la vapeur surchauffée, il est nécessaire de recourir à un surchauffeur (source de chaleur indépendante) en aval de la chaudière à tubes de fumées.

6.2.3 CHAUDIÈRES À TUBES D'EAU

A l'inverse des chaudières à tubes de fumées, les chaudières à tubes d'eau sont conçues de sorte que ce soit l'eau qui circule à l'intérieur des tubes. Leur gamme de puissance est large, de 0,1 à 150 tonnes de vapeur par heure. Pour les grandes puissances (20 à 150 t/h), la chaudière est constituée d'une grande chambre de combustion parallélépipédique dont les parois sont tapissées de faisceaux de tubes d'eau verticaux, munis d'ailettes longitudinales soudées (schématisée ci-dessous).



En rouge : surchauffeur permettant de surchauffer la vapeur produite à la température désirée
 En vert : économiseurs

Source : AZProcédé

Figure 3: Schéma de principe d'une chaudière à tubes d'eau

Ce type de chaudière possède deux réservoirs appelés ballon collecteur (ou encore ballon de vaporisation, en partie supérieure) et ballon distributeur (en partie inférieure), reliés par un faisceau de tubes vaporisateurs. Le ballon supérieur réalise la séparation des deux phases liquide et vapeur. Le ballon inférieur alimente en eau liquide tous les tubes dans lesquels l'eau soumise à l'apport de chaleur se vaporise partiellement avant de retourner au ballon supérieur.

Les gaz chauds produits par le brûleur sont directement en contact avec les tubes vaporisateurs à l'intérieur desquels se produit la vaporisation par convection. La vapeur ainsi générée est collectée dans le ballon supérieur, l'eau excédentaire est ramenée vers le ballon inférieur par des tubes de chute non soumis à la chaleur. La circulation de l'eau dans la zone de vaporisation est le plus souvent naturelle dans le cas des chaudières industrielles dont la pression est inférieure à 190 bars. Pour des pressions supérieures, la circulation est assurée par une pompe qui en impose le débit. Dans le cas de la circulation naturelle, le ballon supérieur constitue le point de départ de la circulation de l'eau.

Dans une chaudière à tubes d'eau, la vapeur saturée produite peut cheminer dans un ensemble de tubes installés dans le faisceau tubulaire de la chaudière et soumis à la chaleur dégagée par les gaz de combustion (aussi appelés surchauffeurs). Les gaz chauds apportent donc à cette vapeur saturée une énergie supplémentaire qui en élève la température sans en modifier la pression. On peut ainsi obtenir de la vapeur surchauffée à la sortie.

6.2.4 QUELQUES CARACTÉRISTIQUES IMPORTANTES

Le tableau ci-dessous présente des caractéristiques et valeurs types relatives aux chaudières industrielles. Elles sont fournies pour apporter des éléments de comparaison et de réflexion avec l'installation étudiée. Les valeurs réelles sont à adapter au cas par cas.

	Tubes de fumées	Tubes d'eau
Fluide circulant dans les tubes	Gaz de combustion	Eau alimentaire
Production (t vapeur / h)	0,2 à 50 Moyenne : 3 t/h	0,1 à 150 Moyenne : 35 t/h
Timbre (pression max d'utilisation en bar)	10 à 20	90 à 220
Temp. de rejet des fumées (°C) avant économiseur	220 à 250	300
Rendement	95% avec économiseur	Légèrement inférieur à 95% avec économiseur
Principale caractéristique	Grand volume d'eau sous pression	Très petit volume d'eau sous pression
Vapeur délivrée	Fourniture de vapeur saturée sous faible pression (< 15 bars)	Fourniture de vapeur surchauffée à moyenne et forte pression

Tableau 1 : caractéristiques des chaudières à tubes de fumées et tubes d'eau

6.3 CHAUDIÈRES À EAU SURCHAUFFÉE

Les gaz de combustion traversent l'échangeur de chaleur d'un circuit d'eau surchauffée qui constitue le fluide caloporteur. Par eau surchauffée on entend de l'eau liquide à une température supérieure à 100°C sous pression.

Dans le cas d'une chauffe par biomasse, la technique utilisée est un générateur à tubes d'eau à circulation forcée (des chaudières à tubes de fumées peuvent aussi être utilisées).

Dans un générateur d'eau chaude sous pression, le risque de manque d'eau est pratiquement exclu, mais il y a un risque de vaporisation par élévation anormale de température pouvant résulter d'une insuffisance de débit totale ou partielle et entraîner des surchauffes. Un vase expansion permet pour absorber les variations volumétriques de l'eau contenue dans le système.

L'arrêté du 18/09/67 relatif à la réglementation des générateurs et récipients d'eau surchauffée est applicable.

7 CARACTÉRISTIQUES DES AUTRES ÉQUIPEMENTS LIÉS À LA CHAUDIÈRE

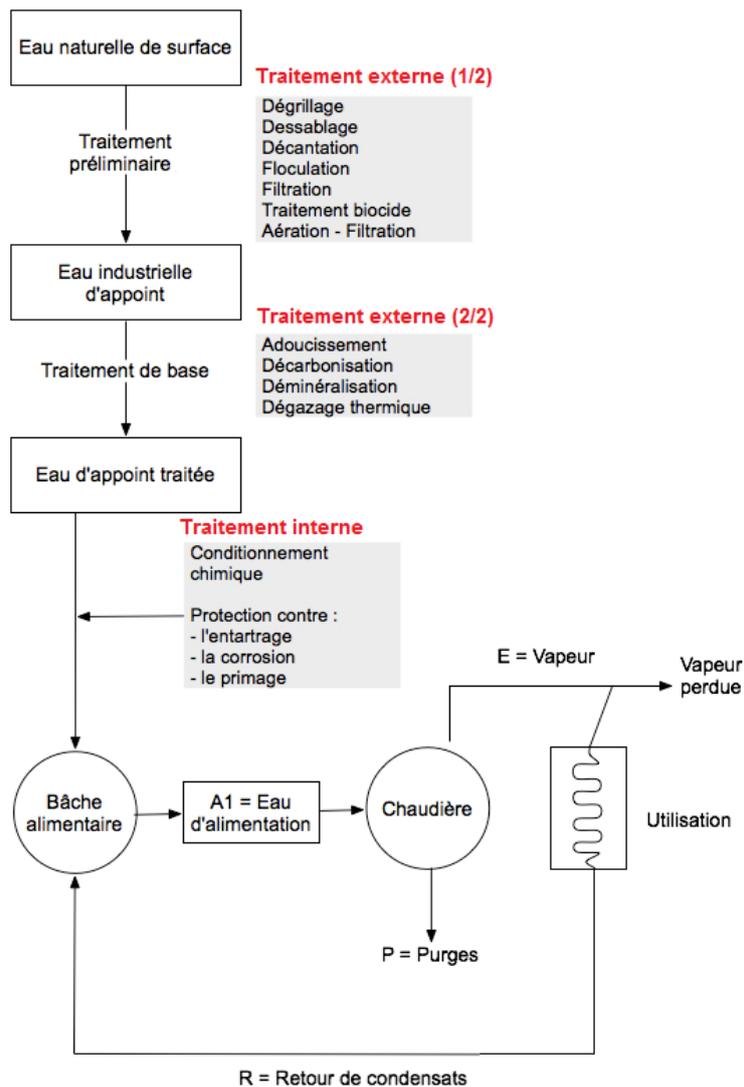
7.1 TRAITEMENT DES EAUX DE LA CHAUDIÈRE

L'eau d'alimentation des chaudières se compose d'eau condensée récupérée et d'eau d'appoint. La composition de l'eau d'alimentation dépend donc de la quantité de condensats qui retourne dans la chaudière et de la qualité de l'eau d'appoint. Le bon fonctionnement d'une chaudière exige :

- Une préparation de l'eau d'alimentation avant son passage dans la chaudière : c'est le traitement externe de l'eau alimentaire ;
- Une protection des surfaces internes de la chaudière : c'est le traitement interne ou conditionnement chimique ;
- Une optimisation du retour du condensat.

Ces mesures visent à éviter les problèmes de tartre, de dépôts, de corrosion et de primage (phénomène d'entraînement de gouttelettes d'eau contenant sels minéraux dissous et matières en suspension par la vapeur qui lui donne un caractère érodant pour les parois rencontrées). Ces problèmes ne sont pas isolés ; par exemple, les mécanismes de concentration sous la couche de tartre ou de dépôt peuvent également entraîner une corrosion sous les dépôts. Le primage peut être du à des niveaux élevés de produits de corrosion dans la vapeur.

Le schéma ci-dessous positionne les différents traitements qui peuvent avoir lieu sur les eaux de chaudière.



Source : <http://www.ms-protech.com/fr/cms/programme-de-traitement-des-eaux-de-chaudieres>

7.1.1 TRAITEMENT EXTERNE

Une première phase consiste à éliminer par filtration les matières en suspension pouvant être présentes dans l'eau brute.

La deuxième phase vise à éliminer les ions calcium et magnésium responsables de l'entartrage par passage sur résines échangeuses d'ions ; c'est l'adoucissement. Les adoucisseurs se présentent sous forme de bouteilles contenant la résine et sont régénérés périodiquement à l'aide d'une solution chargée en chlorure de sodium. Ce type de traitement n'est pas toujours suffisant pour les applications industrielles. En effet, les carbonates, la silice et les autres ions, les gaz dissous passent au travers de ces résines et seront autant de sources de corrosion, d'encrassement, de moussage ou d'entraînement dans la vapeur. L'élimination de ces composés peut être réalisée grâce respectivement à une décarbonatation (qui permet de réduire l'alcalinité de l'eau brute), une déminéralisation et un dégazage thermique.

Le principe d'un dégazeur thermique repose sur la loi de Henry selon laquelle la quantité de gaz dissout dans un liquide, à température constante et à saturation, est proportionnelle à la pression qu'exerce ce gaz sur le liquide. Plus la température du liquide est élevée, plus la pression exercée par le gaz est faible et plus la quantité de ce gaz au sein du liquide sera faible. Le principe de fonctionnement d'un dégazeur thermique consiste donc à maintenir l'eau en ébullition permanente afin d'en extraire les incondensables.

7.1.2 TRAITEMENT INTERNE

Prévention de la formation de tartre et de dépôts

Le principe du conditionnement des eaux de chaudière repose sur les points suivants :

- toute la dureté résiduelle apportée par l'eau d'appoint traitée doit être soit précipitée dans la chaudière sous forme non entartrante, soit chélatée ;
- l'eau de chaudière doit contenir un excès de réactif afin de précipiter une quantité supplémentaire de dureté qui pourrait arriver accidentellement lors d'une déficience de l'adoucisseur d'eau ;
- des dispositions sont à prendre pour éviter les dépôts de silice (dans le cas d'eaux naturelles ayant une concentration en SiO₂ supérieure à 6 mg/l).

Les produits utilisés sont les suivants :

- les phosphates : mono et polyphosphates ;
- les séquestrants ou chélatants : sels de sodium, des acides nitriloacétiques (NTA) et de l'éthylène diamine tétracétique (EDTA) ;
- les dispersants : les tanins, les lignosulfonates, les polyamines, les polymères synthétiques.

Prévention de la corrosion

Un dégazage chimique permet d'éliminer l'oxygène résiduel présent dans l'eau d'alimentation de la chaudière en le combinant avec une substance réductrice. Les principaux réducteurs utilisés sont le sulfite de sodium, l'ammoniac et l'hydrazine.

L'élimination du CO₂ dissous dans l'eau est nécessaire dans les circuits de retour d'eau condensée où le risque de corrosion est important. Des produits au pouvoir neutralisant ou filmogène sont utilisés.

La corrosion due à l'acidité (attaque du fer) est prévenue grâce au réglage de l'alcalinité. Selon le traitement de base utilisé, la correction de l'acidité ou de l'alcalinité de l'eau sera effectuée par l'emploi de phosphates appropriés, de manière à atteindre un pH dans la chaudière voisin de 11.

Prévention du phénomène de primage

Les anti-mousses tels que les alcools, polyols ou silicones peuvent être utilisés.

7.2 TRAITEMENT DES FUMÉES

La combustion de biomasse produit naturellement un mélange de fumées issues de la combustion et constitué de CO₂, vapeur d'eau, particules fines, composés azotés (NO_x), composés organiques volatiles (COV) ou hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) à fort impact négatif sur l'environnement (détérioration de la qualité de l'air, contribution à l'effet de serre, etc.).

Le traitement des fumées de combustion peut être constitué de différentes étapes de traitement selon le type de combustible utilisé :

- Réduction des émissions d'oxydes d'azote (NO_x) ;
- Réduction des émissions d'oxydes de soufre (SO_x) ;
- Dépoussiérage.

7.3 LES CENDRES

La combustion de la biomasse produit des cendres. Les cendres sont récupérées au niveau du foyer et dans le dépoussiéreur.

Les cendres sous foyer sont évacuées manuellement ou, le plus souvent, automatiquement vers une benne, soit par voie sèche (évacuation directement par une vis sans fin ou un convoyeur dans une benne), soit par voie humide. Dans ce cas, les cendres tombent dans un bac rempli d'eau, décantent puis sont évacuées par raclage dans une benne. Plusieurs installations de décendrage ont été recensées :

- Convoyeur à chaînes en cas de décendrage par gravité avec récupération des cendres par voie humide,
- Décendrage mécanique par convoyeur à vis sans fin vers le cendrier (foyer à grilles mobiles),
- Décendrage par turbulateur rotatif horizontal (pâle rotative raclant le fond du foyer),
- Décendrage par aspiration (intervention humaine) avec turbine d'aspiration, lance d'aspiration et canalisation.

Ces installations peuvent être complétées par des broyeurs.

Les cendres sont ensuite stockées dans des bennes, cendriers ou cases en béton.

Les cendres dites volantes sont récupérées aux niveaux des différents systèmes de dépoussiérage, généralement dans des bennes ou des big-bags.

8 POTENTIELS DE DANGERS LIÉS AUX ÉQUIPEMENTS

L'identification des dangers liés aux équipements et au procédé tient compte :

- des différentes catégories de dangers présentés par les substances présentes ;
- des différents équipements et de leurs dangers associés (présence de flamme, eau sous pression, etc.) ;
- des conditions opératoires d'utilisation et de mise en œuvre ;
- des conditions de fonctionnement.

Il est réalisé sur la base du retour d'expérience et doit être réalisé sur chaque site en préalable aux analyses de risques. Ces dangers sont détaillés dans les paragraphes suivants pour chaque équipement relatif au fonctionnement d'une chaufferie à biomasse.

8.1 DANGERS LIÉS AU STOCKAGE DE BIOMASSE

Le combustible est généralement livré par des camions bennes dans des bâtiments qui peuvent être utilisés pour la livraison et le stockage.

En amont du stockage, ces opérations de déchargement des combustibles conduisent à la mise en suspension de poussière dans la zone de déchargement (fosse, trémie de déchargement) : cela peut conduire à la formation d'un nuage de poussières et en cas de présence d'une source d'inflammation à une explosion de poussières ou à un incendie.

En aval, le combustible est amené dans la chaudière via un système de convoyage qui alimente une trémie d'alimentation.

Le stockage est généralement réalisé soit dans des silos plats, soit dans des silos verticaux, soit dans des espaces bâtimentaires ouverts. Les silos peuvent être conçus en béton ou en métal selon le produit reçu.

L'ensilage conduit à la mise en suspension dans l'air de poussières de combustibles. La suspension qui se forme dans le ciel du silo peut être suffisamment concentrée en fines particules pour constituer un nuage de poussières.

De plus, les poussières fines se déposent et s'accumulent à la longue, dans les locaux où sont installés les contenants de stockage, parce que la liaison entre ces contenants et les équipements de manutention n'est jamais parfaitement étanche : la mise en suspension de ces dépôts peut former un nuage de poussières dont le volume dépend de la masse de pulvérulent contenue dans le dépôt (notamment sur les murs et sur les supports de charpente dans la partie des locaux de stockage du biomasse).

Les phénomènes de décharge électrostatique ou le transfert de produit incandescent (lors de travaux par points chauds par exemple) peuvent enflammer un nuage de poussières.

D'autre part, lors de stockage plus long que d'habitude ou lors de travaux par points chauds, le combustible est susceptible de donner lieu à un phénomène d'auto-échauffement ou à une fermentation qui peut :

- entraîner une combustion du produit sous forme de feu couvant ;
- constituer une source d'inflammation d'un nuage de poussières présente à proximité.

Dans le cas de stockage ouvert, des dépôts peuvent également être remis en suspension localement. Le combustible, comme dans un silo, peut également subir un phénomène de fermentation ou d'auto-échauffement.

Ainsi, les dangers associés aux installations de déchargement et de stockage (alimentation, stockage, silo tampon) sont :

- l'incendie soit par combustion des matières en présence d'une source d'inflammation, soit par auto-échauffement de la biomasse, soit par fermentation aérobie,
- l'explosion de gaz de pyrolyse en cas de formation d'un nuage constituée d'un mélange d'air et de gaz (CO, CH₄...) pouvant résulter de la combustion incomplète du combustible après auto-échauffement de la biomasse (par exemple, en cas de température du produit dépassant la température critique, d'augmentation de la durée de stockage suite à des travaux ou arrêt imprévu suite à une panne) ;
- l'explosion de poussières de biomasse suite à la formation d'un nuage de poussières, en cas de présence d'une source d'inflammation (biomasse incandescente dans la biomasse issue du stockage, travaux par points chauds, frottements mécaniques sur des dépôts de poussières contenant des huiles de graissage (éléments mécaniques de transfert)). Les circonstances dans lesquelles un feu couvant amorcé dans un silo peut constituer une source d'inflammation d'un nuage de poussières présente à proximité peuvent correspondre au scénario suivant :

le pulvérulent stocké est le siège d'un auto-échauffement qui l'échauffe suffisamment pour amorcer un feu couvant ;

la zone en combustion se propage et atteint la surface du stockage.

- l'ensevelissement, en cas d'effondrement des parois du stockage.

Dans le cas de la trémie, il est précisé que le risque d'explosion secondaire en amont de la trémie devra être pris en compte, en cas d'explosion de poussières dans la trémie.

8.2 DANGERS LIÉS AUX ÉVENTUELLES INSTALLATIONS DE PRÉPARATION DU COMBUSTIBLE

Les installations de préparation des combustibles incluent :

- Les équipements de criblage, triage et tamisage,
- Les sélecteurs (avec table vibrante ou sélecteur à air),
- Les broyeurs.

Ces opérations de criblage, triage, tamisage, broyage conduisent, par la manutention du combustible, à la mise en suspension de poussières dans les différentes installations utilisées pour ces opérations et ce, même si les matières premières d'un combustible ont des granulométries telles que le risque d'explosion de poussières est a priori faible, voire écarté. De plus, ces installations peuvent être sujettes à des pertes de confinement entraînant la mise en suspension de poussières.

Les dangers principaux concernent l'incendie et l'explosion de poussières, en cas de présence d'une source d'inflammation qui peut être apportée par un bourrage de l'équipement, un échauffement mécanique ou encore l'accumulation de matières conduisant à un auto-échauffement.

8.3 DANGERS LIÉS AUX INSTALLATIONS DE CHARGEMENT, TRANSFERT ET DE CONVOYAGE

Les dangers liés aux camions-bennes et aux camions-citernes utilisés au niveau du quai de déchargement ne sont pas évoqués dans ce paragraphe, mais doivent être pris en considération dans l'étude de dangers.

Lorsqu'elles sont confinées (soit par nature comme pour le transporteur à chaîne, soit par conception comme pour une bande dans une galerie), les installations de transfert peuvent être le lieu d'explosion de poussières ou d'incendie.

La manutention d'un combustible provoque la mise en suspension inévitable des poussières ou du pulvérulent, au moins à proximité des emplacements où le combustible est déversé (pour les convoyeurs et transporteurs), voire même sur toute la longueur de l'équipement. Dans le cas d'un élévateur à godets, la rupture d'une sangle ou le décrochement d'un godet peut également générer la mise en suspension de poussières. Consécutivement, un nuage de poussières peut se former à proximité de ces emplacements, non seulement à l'intérieur de l'équipement lorsque ce dernier est capoté, mais aussi à proximité de l'équipement dans le local de travail où il est installé, lorsque l'équipement n'est pas capoté. Afin de limiter la mise en suspension des poussières de combustibles, les vitesses de transfert de la biomasse doivent être réduites.

Les sources d'inflammation d'un nuage de poussières sont diverses : la surchauffe du matériel due à un engorgement ou au, la présence d'un élément métallique, la présence d'une charge statique, des courants vagabonds, un échauffement mécanique notamment en cas de patinage des bandes ou des courroies ou en cas de frottement de pièces mécaniques en mouvement (grippage de paliers, ...).

Par ailleurs, les opérations de transfert peuvent également générer un sur-échauffement des poussières présentes conduisant au départ d'un incendie.

8.4 DANGERS LIÉS AUX ESPACES BÂTIMENTAIRES

Les espaces bâtimentaires correspondent à tous les espaces dans lesquels se trouvent des équipements générant des poussières : galeries abritant des transporteurs, tour de manutention, bâtiment de préparation, etc.

Les poussières de biomasse ou les combustibles sous forme pulvérulente se déposent et s'accumulent à la longue, dans les locaux où sont installés les contenants de stockage, les équipements de transfert ou les équipements de préparation du

combustible. En effet, même si les différents équipements et convoyeurs sont capotés ou conçus pour être étanches, les équipements ou les liaisons ne sont jamais parfaitement étanches et l'accumulation de poussières reste possible dans tous les espaces bâtimentaires : la mise en suspension de ces dépôts peut former un nuage de poussières.

Aussi, les risque d'explosion de poussières en cas de présence d'une source d'inflammation et d'incendie (feu couvant) par effets domino se retrouvent au niveau des espaces bâtimentaires.

8.5 DANGERS LIÉS AU SYSTÈME D'ASPIRATION ET DE DÉPOUSSIÉRAGE

Le dépoussiérage consiste à capter les poussières par aspiration, transporter l'air empoussiéré et séparer les poussières de l'air, au niveau des fosses de réception de combustibles, des équipements de manutention et des silos de stockage, en utilisant des filtres à manches ou des cyclones.

Selon le niveau d'empoussiérement du flux d'air empoussiéré, ce flux constitue ou non une ATEX. Le niveau peut varier dans le temps, selon l'activité générant la mise en suspension des poussières aux points d'aspiration de l'air empoussiéré.

Cas d'un cyclone :

Le risque de remise en suspension intervient dans le sas qui peut exister avant le cyclone et dans le stockage des poussières en bas de l'équipement où les poussières sont récupérées.

Le stockage des poussières en bas de l'équipement peut également donner lieu à un auto-échauffement.

Cas d'un filtre :

Lors de chaque cycle de décolmatage, les poussières accumulées sur les manches sont remises en suspension et tombent dans une installation de stockage : une ATEX se forme alors certainement dans la partie « air empoussiéré » du filtre.

Côté « air dépoussiéré », une ATEX peut se former si une manche vient à se rompre ou à se démancher, conduisant à une fuite d'air empoussiéré.

Le fait que le filtre fonctionne en dépression par rapport à la pression atmosphérique évite qu'il se produise une fuite d'air empoussiéré vers l'extérieur. Il n'y a donc pas à considérer, a priori, de risque de formation d'une ATEX à l'extérieur du filtre.

Pour ce qui concerne les sources d'inflammation, bien que les manches soient antistatiques, le chargement électrostatique des poussières. électrostatique lors de leur aspiration reste une source d'inflammation possible de l'ATEX présente dans le filtre côté air empoussiéré.

L'ATEX présente dans le filtre côté air empoussiéré peut également être enflammée par des particules incandescentes qui seraient produites lors de travaux par points chauds et véhiculées jusqu'au filtre par le flux d'air empoussiéré.

A noter qu'au cas où une explosion s'amorcerait dans le filtre, il faut s'attendre à ce qu'elle soit suivie d'un incendie du pulvérulent déposé sur les manches ou contenu dans la trémie et une propagation à l'ensemble du circuit est possible.

Cependant, l'opération de filtration n'échauffe pas le pulvérulent et il n'y a pas a priori de risque d'auto-échauffement (sauf s'il y a accumulation de poussière dans le bas du filtre). Un tel risque pourrait toutefois exister si la température du pulvérulent mis en œuvre dépasse la température critique d'auto-échauffement en prenant en compte les dimensions du filtre.

8.6 DANGERS LIÉS À LA CHAUDIÈRE À COMBUSTIBLE BIOMASSE

8.6.1 TRÉMIE D'ALIMENTATION DE LA CHAUDIÈRE

Le combustible est amené dans la chaudière via un système de convoyage qui alimente la trémie d'alimentation de la chaudière (volume de la trémie de quelques m³) : le combustible n'est pas stocké dans cette trémie car cette trémie a des cycles de vidange de l'ordre de l'ordre de la minute à quelques dizaines de minutes.

Même si ce n'est qu'un lieu de transfert de combustibles et que le temps de stockage est faible, les dangers qui pourraient être associés à la trémie d'alimentation sont les suivants :

- le risque d'incendie dans la trémie¹ ;
- l'explosion de poussières de biomasse ou l'explosion de CO, en cas de présence d'une source d'inflammation (notamment défaut d'étanchéité du système engendrant une remontée de gaz de combustion depuis la chaudière ou un retour de flamme depuis la chaudière vers la partie inférieure de la trémie d'alimentation).

8.6.2 DANGERS LIÉS À LA CHAUDIÈRE

Les risques principaux sont l'explosion au niveau de la chambre de combustion et l'éclatement de capacité d'eau.

L'explosion au niveau de la chambre de combustion peut faire suite à :

- une accumulation de gaz de combustion (et en particulier formation d'une poche de CO) lors de la combustion de la biomasse,
- mais également, dans le cas d'un allumage au gaz naturel, à une accumulation de gaz naturel dans la chambre, en particulier lors de la phase d'allumage. En effet, le gaz naturel est utilisé pour le démarrage de la flamme et peut être également utilisé en appoint si nécessaire.

L'incendie de chaudière est un événement possible. Il n'est pas étudié dans ce guide car ses effets restent généralement limités au site.

Certaines chaudières disposent de grilles tournantes sur lesquelles le combustible est projeté ou de dispositifs de pulvérisation. Ces éléments peuvent générer un nuage anormal de poussières en cas de dysfonctionnement ou en cas de défaillance de

¹ Le retour d'expérience de la base ARIA du BARPI montre l'existence d'au moins un incendie (accident n°47366) et une explosion (accident n°35499) dans une trémie d'alimentation de chaudière biomasse bois.

l'approvisionnement en combustibles, conduisant à la formation d'un nuage de poussières et à une explosion de poussières.

L'éclatement ou BLEVE de la capacité d'eau se produit en cas d'augmentation de la pression dans la capacité d'eau, soit lentement si celle-ci est chauffée par un incendie, soit brutalement en cas de vaporisation brutale de l'eau lors d'une remise en eau de tubes surchauffés. Ce phénomène n'est pas recensé dans l'accidentologie des chaudières biomasse, mais il est cependant physiquement possible et donc retenu dans la suite de ce guide.

8.6.3 DANGERS LIÉS AUX INSTALLATIONS DE DÉCENDRAGE

Le danger principal est l'incendie en cas d'autocombustion des imbrulés ou en cas de présence de particules incandescentes, dans l'ensemble de l'installation de décendrage y compris le stockage des cendres (pouvoir résiduel d'oxyréactivité selon les conditions de tirage de la chaudière).

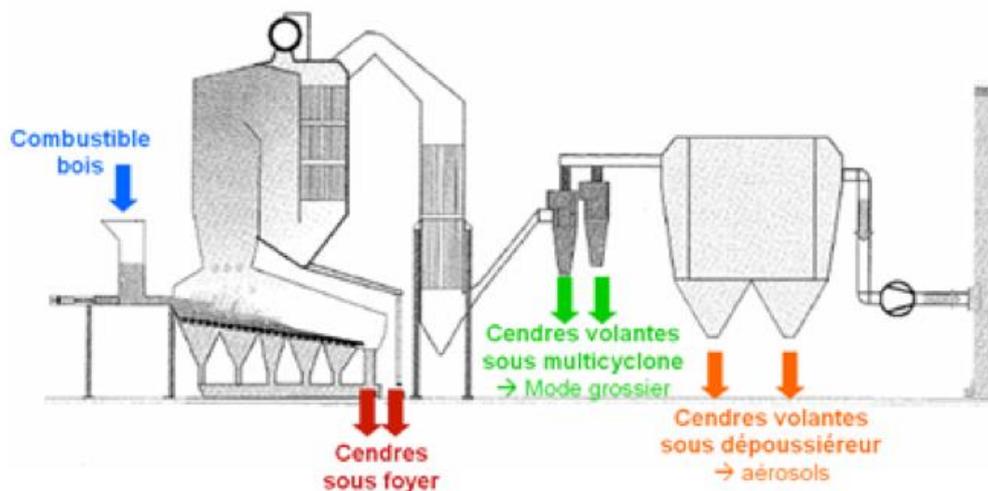


Figure 4 : Schéma de répartition des cendres au sein d'une unité de combustion de solides (source : <http://www.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/passer-a-l'action/produire-chaleur/dossier/bois-biomasse/technologies-installations-secteurs-collectifertiaire-industriel/>)

Les cendres varient en fonction de leur composition (en particulier, leur teneur en éléments métalliques et en composés organiques) et de leur granulométrie. Selon leurs caractéristiques, elles peuvent être évacuées en centre d'enfouissement technique (CET), ou valorisées par exemple en épandage agricole ou en co-compostage. La réglementation² indique que : « Les sous-produits et déchets issus de la combustion (cendres, mâchefers, résidus d'épuration des fumées...) sont, lorsque la possibilité technique existe, valorisés, en tenant compte de leurs caractéristiques et des possibilités du marché (ciment, béton, travaux routiers, comblement, remblai...) ».

² Jusqu'au 20 décembre 2018 : la réglementation désigne l'article 53 de l'arrêté du 26 août 2013 relatif aux installations de combustion d'une puissance supérieure ou égale à 20 MW soumises à autorisation au titre de la rubrique 2910 et de la rubrique 2931, applicable pour les installations autorisées relevant de la rubrique 2910 et d'une puissance supérieure ou égale à 20 MW.

L'arrêté préfectoral peut autoriser la valorisation des cendres par retour au sol dans le cadre d'un plan d'épandage qui respecte l'ensemble des dispositions de la section 4 du chapitre V et des annexes associées de l'arrêté du 2 février 1998 susvisé.

Les cendres peuvent être mises sur le marché en application des dispositions des articles L. 255-1 à L. 255-11 du code rural applicables aux matières fertilisantes »

La composition chimique des cendres détermine leur température de fusion. Cette fusion des cendres pose des problèmes de formation de mâchefer dans les foyers de combustion, qui obstrue et dégrade la qualité de la combustion. En effet, lorsque les cendres s'agglomèrent en mâchefers imperméables à l'air, cela dégrade le fonctionnement du foyer (collage des cendres sur les barreaux de grille, sur les parois latérales du foyer, attaque chimique et corrosion du matériel, obstacle à la bonne répartition de l'air de combustion, difficultés d'évacuation etc.). Aussi, la température de fusion des cendres est essentielle à connaître afin d'évaluer la tendance d'un combustible à former du mâchefer. Il existe un test normalisé permettant de mesurer le comportement des cendres lorsqu'elles sont portées entre 800 et 1500°C. Il s'agit du test de fusibilité (norme ISO 540:1981 - Combustibles minéraux solides -- Détermination de la fusibilité des cendres -- Méthode du tube à haute température).. La nécessité d'éviter la formation d'imbrûlés, et surtout de mâchefers, impose une température minimale et une température maximale de foyer. Ces deux températures délimitent une zone d'opérabilité, qui est assez étendue avec les bois, mais réduite, voire quasi nulle, avec les biomasses d'origine agricole. La maîtrise de l'apport d'air au combustible est fondamentale pour garantir une bonne qualité de combustion. Elle permet d'éviter la plupart des dysfonctionnements du foyer : formation de mâchefers, formation d'imbrûlés, présence de carbone dans les cendres, dégradation des réfractaires, etc.

La quantité et la qualité des cendres sont très variables selon le type de biomasse utilisé. En particulier, les biomasses agricoles sont plus chargées en minéraux alcalins et génèrent un volume de cendres plus important (jusqu'à 10 % en masse) que les biomasses forestières. De plus, leur composition chimique différente pose également des problèmes de fusion de ces cendres. En effet, les biomasses agricoles ont des températures de fusion des cendres basses qui sont principalement dues à la composition chimique des biomasses. Ces températures, de l'ordre de 600-700 °C sont trop basses par rapport à la température des foyers classiques de chaudières, aux alentours de 1000°C et conduisent à la formation de mâchefers. Ces biomasses agricoles conduisent également à des fumées plus chargées en soufre et en chlore que le bois, à l'origine de la formation d'acides et sont plus corrosives.

A partir du 20 décembre 2018 : la réglementation désigne l'article 53 de l'arrêté du 3 août 2018 relatif aux installations de combustion d'une puissance thermique nominale totale supérieure ou égale à 50 MW soumises à autorisation au titre de la rubrique 3110, applicable pour les installations autorisées relevant de la rubrique 3110 et d'une puissance supérieure ou égale à 50 MW.

Annexe B

Combustibles solides de type biomasse : définition, exemples, caractéristiques et risques

1 INTRODUCTION

Les types de biomasse pouvant être utilisés dans une chaudière à biomasse sont ceux définis dans la rubrique 2910 (cf. § 1.2.1 du rapport et tableau 1). Les typologies de ces biomasses utilisées en chaufferies sont détaillées par rapport à leur origine et leurs caractéristiques dans la présente annexe. Les éléments présentés sont issus des documents de référence suivants :

- ADEME Référentiel 2008-1-PF : les plaquettes forestières Définition et exigences, 25 avril 2008,
- ADEME Référentiel 2008-2-CIB : les connexes des industries du bois Définition et exigences, 25 avril 2008,
- ADEME Référentiel 2008-3-PBFV : les produits en fin de vie Définition et exigences, 25 avril 2008,
- ADEME Etude n°08-0231/1A : Valorisation énergétique des déchets de biomasse d'origine végétale, juin 2010,
- FIBRA¹, Les combustibles bois : Définitions et adéquation combustibles-chaudières, février 2010,
- Techniques de l'Ingénieur article BE8752 : Co-combustion de charbon et de biomasse - Cas des chaudières industrielles, 10 avril 2010.

Ils complètent les éléments des chapitres 1.2.2, 1.2.3 et 2.2.1 de ce rapport.

Des spécifications relatives aux biocombustibles solides sont précisées dans la norme ISO 17225 « biocombustibles solides — Classes et spécifications des combustibles » qui classent les combustibles en fonction de leurs propriétés et donnent des exigences de qualité sur les combustibles.

2 TYPES DE BIOMASSE

Les 3 types de biomasse identifiées sont les suivants :

- La biomasse de type bois,
- Les produits et sous-produits agricoles,
- La biomasse provenant de cultures énergétiques dédiées.

Le tableau ci-après détaille cette typologie.

Combustible	Description
Déchets de la sylviculture, de l'exploitation	Bois sous divers aspects : poussières de bois, sciures, écorces, chute/résidus de bois, criblât de compostage, bois déchiqueté, copeaux de bois, granulés, pellets,

¹ Fédération Forêt Bois Rhône-Alpes

Combustible	Description
forestière, de l'industrie mécanique du bois, déchets de bois en fin de vie	<p>plaquettes forestières (sous-produits de l'exploitation sylvicole), palettes de bois propres en fin de vie, bois d'élagage.</p> <p>Ces combustibles sont soit du bois récupéré, soit du bois issu de forêt et de son exploitation, soit du bois issu de l'entretien paysager, soit des sous-produits des entreprises de la transformation du bois.</p> <p>Ces combustibles ont des caractéristiques différentes, notamment en termes de taux d'humidité et de granulométrie.</p> <p>Les pellets et granulés sont les formes physiques les plus courantes : ils correspondent le plus souvent à de la sciure compressée et agglomérée par presse sous haute pression en petits cylindres. La lignine contenue dans le bois assure l'homogénéité et la résistance des granulés. Aucun additif n'est utilisé. Toutefois, certaines formes (plaquettes agricoles, plaquettes de l'industrie du bois) peuvent potentiellement montrer des traces d'imprégnation ou de revêtement.</p>
Biomasse verte en culture énergétique	Biomasse herbacée pérenne (miscanthus, switchgrass - ce sont des cultures récoltées annuellement et avec des durées de vie de 10 à 20 ans) ou taillis à très courtes rotations (peupliers, saules, avec des plantations à haute densité et dont on récolte les rejets de souches tous les 2-3 ans)
Déchets de l'industrie agroalimentaire du grains ou résidus des récoltes	Céréales (paille de céréales, poussières de céréales, balles de riz, cannes de céréales)
Résidus des récoltes des oléagineux	Oléagineux (pailles et cannes d'oléagineux - exemple : lin oléagineux, colza, tournesol), sarments de vignes

Tableau 1 : Typologie de combustibles solides

Ces types de biomasse sont décrits ci-après.

2.1 BIOMASSE DE TYPE BOIS

Les combustibles-bois sont très divers : les sous-produits de l'exploitation forestière, les écarts de tri du bois d'œuvre ou d'industrie, les sous-produits de scieries, les palettes et caisses usagées d'emballage, les écarts de tri du compostage des déchets verts, l'élagage des arbres routiers ou urbains, voire les meubles usagés récupérés en déchèteries, les vieux panneaux en agglomérés, MDF ou OSB, les bois de la déconstruction sélective des bâtiments, etc.

Les combustibles bois se présentent sous des aspects très divers (plaquettes, écorces, sciures, copeaux, chutes, granulés, etc.) et avec des caractéristiques différentes, notamment en termes de taux d'humidité, de granulométrie et de taux de cendres. Deux critères sont prépondérants : la granulométrie et le taux d'humidité, qui est lié au Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI).

L'ADEME distingue les combustibles bois selon leur origine avec 4 grandes familles :

1. Les plaquettes forestières,
2. Les produits connexes des industries du bois,
3. Les produits bois en fin de vie,
4. Les mélanges (ensemble de produits contenant une proportion inconnue de ses composants (définition CEN TC335/TS 14961) et les préparations (ensemble de produits contenant une proportion connue de ses composants (définition CEN TC335/TS 14961)).

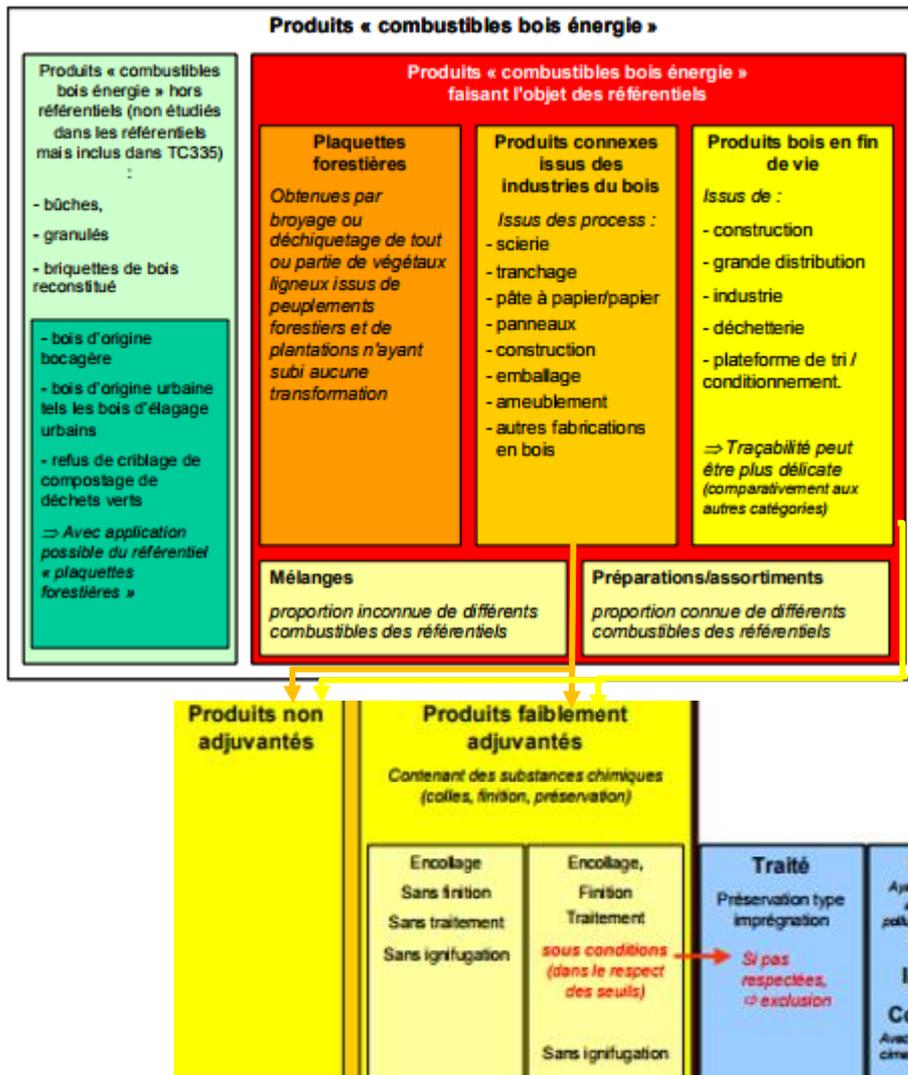


Figure 1 : Distinction entre les différents types de combustibles bois (source : ADEME Référentiel 2008-2-CIB : les connexes des industries du bois Définition et exigences, 25 avril 2008)

Les définitions ci-après sont issues des documents de l'ADEME.

2.1.1 PLAQUETTES FORESTIÈRES

Les ressources issues de l'exploitation forestière et des espaces boisés qui génèrent des plaquettes forestières. Celles-ci proviennent de résidus d'égagement ou de défrichage qui peuvent ainsi contenir des écorces, des branches, des brindilles, des feuilles ou encore des aiguilles. Les opérations entrant en jeu dans leur production sont l'ébranchage et la découpe, le débardage, le déchiquetage et le séchage de tout ou partie de végétaux ligneux issus de peuplements forestiers et de plantations n'ayant subi aucune transformation (directement après exploitation). Du fait de leur origine, les plaquettes forestières peuvent contenir des fragments de bois, d'écorce, de feuilles ou d'aiguilles. Le broyage ou le déchiquetage peut se réaliser en forêt, en bord de parcelle, sur place de dépôt, sur aire de stockage ou directement à l'entrée de la chaufferie et/ou de l'unité de transformation.

2.1.2 PRODUITS CONNEXES DES INDUSTRIES DU BOIS, DÉCHETS DE LA SYLVICULTURE ET DE L'EXPLOITATION FORESTIÈRE

Les produits connexes des industries du bois (ou sous-produits) sont issus de l'**industrie du bois** de première transformation (scieries) et seconde transformation (menuiseries, tourneries) et sont constitués de : écorces, sciures, copeaux, plaquettes et broyats, dosses, délignures, chutes de tronçonnage, chutes de production de merrains, chutes de placage, mises au rond des bois déroulés et noyaux de déroulage, chutes d'usinage de panneaux à base de bois, chutes de fabrication de parquets, menuiseries, éléments de charpentes, etc.

Ce sont donc des écorces, des copeaux et sciures, des plaquettes, des granulés.

Ces produits peuvent être exempts de tout traitement chimique : écorces, dosses, délignures, chutes de fabrication de merrain, etc. Certains peuvent contenir des adjuvants chimiques qui contiennent ou non des métaux lourds et/ou organo-halogénés.

Certains produits peuvent être considérés comme combustibles bois énergie (ex. panneaux de particules, bois aboutés, poutre en lamellé, ...), d'autres (ex. certains bois traités avec des produits de préservation) peuvent entrer dans la catégorie des combustibles de récupération.

2.1.3 DÉCHETS DE BOIS EN FIN DE VIE

Les centres de tri ou de déchets industriels banals qui permettent la valorisation de bois de rebut non souillé : emballages industriels (caisses, emballages), palettes et emballages légers (cageots et cassettes pour fruits et légumes), autres éléments en bois (mobilier, éléments en bois provenant de la déconstruction, etc.). Une plate-forme de préparation est nécessaire pour produire du combustible à partir de bois de rebut non souillé. Elle se compose d'un prébroyage grossier, d'un broyage fin, d'un déferraillage et d'un criblage. Les broyats de rebut constituent un produit sec mais relativement grossier et de qualité variable.

Certains produits peuvent contenir des adjuvants et traitements. Certains produits peuvent donc être des déchets dangereux. Une attention particulière est portée à la présence de métaux lourds et de substances halogénées.

2.1.4 MÉLANGES ET PRÉPARATIONS

Les mélanges et préparations sont assimilables à des combustibles bois si chacun des différents combustibles qui les composent sont assimilables à des combustibles bois énergie. L'origine du mélange ou de l'assortiment/préparation doit être décrite. Si le mélange ou l'assortiment/préparation est susceptible de contenir des matériaux traités chimiquement, cela doit être mentionné.

2.1.5 RÉCAPITULATIF

Les tableaux suivants issus du document de la fédération FIBRA² reprennent les types de combustibles de bois. Une distinction est faite en fonction de la définition de la biomasse fournie dans la rubrique 2910 de la nomenclature et donc en fonction de la rubrique dont les chaudières relèvent (cf. chapitre 1.2.2 de ce rapport).

Lignes de produits	Types du produit	Commentaires
1) Plaquettes forestières** 	a) Plaquettes forestières sèches	Sous-produits de la sylviculture. Humidité < 30 %
	b) Plaquettes forestières humides	Sous-produits de la sylviculture. Humidité > 30 %
2) Plaquettes de scieries 	c) Plaquettes de scieries sèches	Sous-produits de scieries. Humidité < 30 %
	d) Plaquettes de scieries humides	Sous-produits de scieries. Humidité > 30 %
3) Ecorces 	e) Ecorces broyées calibrées	Par le broyage- calibrage, l'écorce passe du statut de déchet à celui de produit
4) Sciure de scieries 	f) Sciure de scieries tamisée	Le tamisage évite la présence de produits grossiers
5) Granulés de bois 	g) Granulé "haute performance"	Ces dénominations sont issues de la marque NF Granulés biocombustibles (2008)
	h) Granulé "standard"	
	i) Granulé "industriels"	

Tableau 2 : Bois de type qualité biomasse pour les chaudières classées en rubrique 2910A (source : les combustibles bois de FIBRA)

² Les combustibles bois : Définitions et adéquation combustibles-chaudières, février 2010 de la fédération Forêt Bois Rhône-Alpes (FIBRA)

Lignes de produits	Types du produit	Commentaires
1) Plaquettes agricoles* faiblement adjuvantées ou souillées	a) Plaquettes agricoles sèches	Sous-produits de la sylviculture. Humidité < 30 %
	b) Plaquettes agricoles humides	Idem que ci-dessus, mais Humidité > 30 %
2) Bois faiblement adjuvantés ou faiblement souillés	c) Plaquettes sèches industries du bois	Produits souvent très secs (humidité < 10 ou 15 %)
	d) Sciure sèche/tamisée des industries du bois hors scieries	Idem que ci-dessus. Importance du tamisage selon la destination.
	e) Plaquettes sèches d'élagage** autres que bocagères	Ces matières ne sont pas assimilables au bois forestier. Humidité < 30 %
	f) Plaquettes humides d'élagage** autres que bocagères	Humidité > 30 %
	g) Plaquettes humides de bois de flottaison	Humidité > 30 % (surveiller contamination)
	h) Plaquettes sèches de bois de flottaison	Humidité < 30 % (surveiller contamination)
3) Bois en fin de vie adjuvantés ou souillés ou traités ou ignifugés ou composites	i) Criblât de refus de compostage	Contamination en plastiques, liens métalliques, fragments de pots, etc.
	j) Broyat calibré de bois de palettes ou d'emballage	Importance du calibrage et de la démétallisation. Contamination possible par des films plastique, peinture, plots de palettes en aggloméré, des traitements phytosanitaires, etc.
	k) Broyat calibré de panneaux ou déchets d'ameublement	Présence de liants et substances de revêtement (vernis, peintures, plastiques, etc. Importance du calibrage. Produits très secs (Humidité < 5 %)
	l) Broyat calibré de déchets de déconstruction, poteaux, traverses ou tourets	Matières très contaminées.

Tableau 3 : Bois de type qualité récupération pour les chaudières classées en rubrique 2910B ou autres (source : les combustibles bois de FIBRA)

Il est à noter que les sciures, écorces, chutes de bois présentent plus de poussières que les plaquettes forestières.

2.2 PRODUITS ET SOUS-PRODUITS AGRICOLES

Il s'agit de produits très divers : la paille de céréales, le marc de raisin, les coques de riz, les noyaux d'olives ou les rafles de maïs. Ces résidus peuvent être très différents en termes de caractéristiques physico-chimiques (humidité, taux de cendres, teneurs en chlore, soufre, azote et métaux alcalins).

2.2.1 RÉSIDUS DE RÉCOLTE

Les résidus de récolte sont majoritairement constitués des pailles et des cannes de céréales et des oléagineux, et des sarments de vignobles. Ces résidus représentent cependant un gisement très important, de près de 20 millions de tonnes.

Il s'agit essentiellement de :

- Pailles de céréales : co-produits de la culture de céréales à petits grains: blé, orge, avoine, seigle, riz, triticales. constituée de la tige lignifiée rigide de la plante récoltée à maturité. En moyenne, une paille de céréales au moment de la récolte est composée de 75 à 88% de matière sèche. Les caractéristiques chimiques donnent un pci moyen 4 600 kWh/t matière sèche. La teneur des pailles en azote, soufre et chlore (20 fois plus que le bois) provoquent la production de gaz acides en combustion et donc des risques de corrosion (voir deuxième partie). De même les pailles contiennent en moyenne 1 % de potassium (soit 10 fois plus que le bois), ce qui entraîne une température de fusion des cendres plus basse.
- Cannes de maïs : coproduits de la culture du maïs grain. Ils sont constitués de la tige, des feuilles et des spathes de la plante récoltée lorsque les grains sont à maturité. Les cannes contiennent de la matière organique et de l'eau à hauteur de 80 %¹¹ au moment de la récolte du grain. La teneur en eau peut baisser jusqu'à 60 % au moment de la récolte des cannes¹². C'est une biomasse non contaminée. Le pci moyen est de 4 830 kWh/ts (CLIP 1999). Les cannes de maïs contiennent 15 fois plus de potassium (1,5 %) et 8 fois plus de chlore (0,08 %) que le bois.
- Les pailles et cannes d'oléagineux : résidus de la récolte des oléagineux (colza et le tournesol majoritairement). Ils sont composés de la tige de la plante broyées lors de la récolte ou arrachées puis broyées après récolte. Les concentrations plus importantes que pour les pailles de céréales en soufre et chlore (2 fois plus) entraînent des difficultés d'autant plus grandes pour la combustion. Idem pour la production de cendres.
- Résidus de la viticulture : ce sont les sarments des vignes. Ils se présentent sous formes de branchages plus ou moins épais et alambiqués. Ils peuvent éventuellement être broyés sur la parcelle. Ils sont composés de bois non contaminés. En moyenne, une tonne de sarment est composée de 85% de matière sèche. Le PCI moyen se situe entre 3 800 et 4 200 kWh/t de matière brute.

2.2.2 DÉCHETS DE L'INDUSTRIE AGRO-ALIMENTAIRE

Ces déchets sont issus des industries suivantes :

- Transformation des betteraves : pulpes de betterave. C'est une matière végétale naturelle. Le PCI de la matière sèche est de 4 720 kWh/ts.
- Industrie du grain : sons de riz, balles de riz, produits de pré-triage. Le taux de matière sèche varie peu entre les différents sous-produits, entre 85 et 87% sur produit brut. ;
- Viticulture : marcs et ses coproduits : rafles, pulpes, pépins. Les marcs se présentent sous la forme de résidus solides humides bruns. Le PCI de la matière sèche des marcs de raisins varie de 2 MWh/t de matière brute sur un produit à 55% d'humidité, soit environ 4,5 MWh/ts est de 5,27 MWh/ts. Le pépin de raisin, fortement chargé en lipides, a un PCI de 6.7 MWh/ts.
- Transformation des oléoprotéagineux : drèches de blé. Les drèches de blé sont les résidus issus de la fabrication de bioéthanol.

2.3 CULTURES ÉNERGÉTIQUES

On peut distinguer trois types d'espèces :

- les espèces herbacées pérennes : miscanthus, switchgrass (panic érigé), reed canary grass (alpiste réseau), etc. Ces cultures ont une durée de vie pouvant varier entre 10 et 20 ans et sont récoltées annuellement (la première récolte est cependant réalisée deux ans après la plantation).
- les taillis à très courtes rotations (TTCR) : ce sont des cultures pérennes d'une durée de vie de 20 ans environ, plantées à haute densité et dont on récolte les rejets de souche tous les 2 ou 3 ans. Les espèces les plus répandues sous nos latitudes sont le saule et le peuplier, le robinier ou l'eucalyptus.
- les cultures céréalières annuelles comme le triticale ou le sorgho. Leur utilisation reste encore très marginale.

3 PROPRIÉTÉS DE CES BIOMASSES

Les éléments de ce paragraphe sont intégralement issus de l'article BE8752 des Techniques de l'Ingénieur intitulé « Co-combustion de charbon et de biomasse - Cas des chaudières industrielles, 10 avril 2010 ».

Les combustibles biomasses possèdent des propriétés physico-chimiques relativement différentes selon leur origine ou leur provenance. Les principales grandeurs qui caractérisent l'aptitude des biomasses à la combustion sont :

- la granulométrie ;
- la masse volumique en vrac ;
- un taux de matière volatile élevé, typiquement entre 65 à 70 % et 80 % ;
- une humidité variable selon les types de produits (elle sera faible (15 à 30%) pour des combustibles comme la paille de céréales ou le broyat de palettes, mais élevée (40 à 60%) pour le bois issu de l'exploitation forestière et de l'industrie de transformation du bois). La teneur en humidité de la biomasse est variable du simple au double selon la période où le bois est acheminé sur le site en été ou en hiver, ceci a un impact sur la mise en suspension des fines ;
- un taux de cendres également variable selon les types de biomasses ;
- la fusibilité des cendres ;
- un PCI sur sec autour de 5 000 kWh/t, à 5 % près ;
- une teneur massique en carbone comprise entre 46 et 51 % ;
- une teneur massique en azote généralement faible pour du bois (0,1 à 0,4 %) mais qui peut augmenter pour de la biomasse agricole (jusqu'à 1 à 1,5 % pour la paille) ;
- une teneur en soufre généralement faible (< 0,1 %) permettant de limiter les émissions de SO_x et la corrosion de l'installation ;
- une faible teneur massique en chlore pour du bois non souillé (< 0,05 % mais pouvant atteindre, pour la paille et des herbes énergétiques, des teneurs plus élevées de 0,4 à 1 %), ce qui peut provoquer des émissions de HCl et de la corrosion.³

³ Source : http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/87906_1001c0051-orennox.pdf

Ces éléments sont repris dans le tableau ci-après.

Caractéristique	Coproduit agricole [1]	Cultures énergétiques		Biomasse forestière	Bois de recyclage
	Paille de céréales	Miscanthus	TTCR peuplier	Plaquettes de bois	Broyats de palettes
Matière volatile (% sur sec) (1)	nd	78 à 80	79 à 81	80	77
Humidité (% sur brut) (1)	15 à 20	15 à 20	50 à 55	22	16
PCI(kWh/t)	4 600 à 4 900 (sur sec)	4 700 à 4 900 (sur sec)	5 100 (sur sec)	4 037 (sur brut)	4 055 (sur brut)
Densité (sur brut).....	0,1 (bottes)	0,13 à 0,15 (ensilage)	0,2	0,25	0,20
Taux de cendres à 815 °C (% sur sec) (1)	5 à 8	1 à 3	2 à 4	1,1	0,70
C (% sur sec) (1)	45 à 47	46 à 49	49,2 à 50	51,1	49,3
H (% sur sec) (1)	5,8 à 6,5	5,5 à 6	5,8 à 6	6,2	6,1
O (% sur sec) (1)	40 à 46	43 à 45	39,8 à 40,4	41,1	43,6
N (% sur sec) (1)	0,4 à 1,5	0,1 à 0,2	0,4 à 0,6	0,17	0,29
S (% sur sec) (1)	0,05 à 0,2	0,03 à 0,14	< 0,05	0,02	< 0,01
Cl (% sur sec) (1)	0,1 à 1	0,05 à 0,25	< 0,08	< 0,08	0,03
K (% sur sec) (1)	0,2 à 2,5	0,17 à 0,3	0,4 à 0,5	0,07	0,08
Na (% sur sec) (1)	nd	0,02	0,02	0,02	0,02
Si (% sur sec) (1)	0,1 à 2	0,4 à 1	0,1 à 0,5	0,3	0,1
Zn (mg/kg sur sec)	nd	< 10	20 à 50	30	nd
Pb (mg/kg sur sec)	nd	< 10	< 11	< 11	nd
Fusibilité des cendres					
Température de déformation (°C)	750 à 900	700 à 1 050	1 160 à 1 220	1 116	1 114
Température de fusibilité (°C)	nd	900 à 1 200	1 220 à 1 500	1 173	1 360
Température d'écoulement (°C)	nd	1 200 à 1 450	1 270 à 1 500	> 1 250	> 1 434

Tableau 4 : caractéristiques physico-chimiques de certaines biomasses (source : Techniques de l'Ingénieur article BE8752 : Co-combustion de charbon et de biomasse - Cas des chaudières industrielles, 10 avril 2010)

Ces caractéristiques peuvent varier pour une même biomasse selon les saisons et les traitements de la biomasse en amont du site de valorisation thermique de la biomasse. Ainsi, la teneur en humidité de la biomasse est variable du simple au double selon la période (été ou hiver) durant laquelle le bois est acheminé sur le site.

Les combustibles solides biomasse diffèrent en fonction de leur PCI mais également leur composition chimique et en particulier la teneur en métaux alcalins, azote, halogènes et cendres ; sur ce critère la paille se distingue nettement du bois. Il est également précisé que si toutes les essences de bois peuvent être utilisées en valorisation énergétique, elles n'ont pas toutes les mêmes caractéristiques en termes de PCI, taux de cendre, comportement au déchetage, au séchage à la combustion, etc. Par ailleurs, les essences exotiques peuvent contenir des composés naturels particuliers à surveiller. Il convient d'être vigilant sur le taux de cendre et la propension à produire du mâchefer.

Les biomasses se distinguent des combustibles fossiles (fuel lourd, gaz naturel, etc.), usuellement employés dans l'industrie et les chaufferies collectives, par :

- un pouvoir calorifique plus faible (à cause principalement du taux d'humidité élevé de la biomasse brûlée dans les chaudières et compris la plupart du temps entre 25 et 50 % sur brut) ;
- la présence d'agents comme les alcalins ou le chlore, qui peuvent conduire à des corrosions à haute température ;
- une fusibilité élevée des cendres avec certaines biomasses, ce qui limite l'opérabilité des foyers.

4 CLASSIFICATION DES BIOCOMBUSTIBLES SOLIDES SELON LA NORME NF EN ISO 17225-1

Il est précisé que des standards ont été publiés pour la classification des combustibles et leur qualité :

- Norme EN ISO 17225 (6 parties) intitulée « Biocombustibles solides - Classes et spécifications des combustibles » qui classe la biomasse selon son origine (bois, biomasse herbacée, biomasse issue de fruits, biomasse aquatique, mélanges), les formes commerciales des biocombustibles et leurs propriétés,
- Norme EN 15234 (6 parties) intitulée « Biocombustibles solides - Assurance qualité du combustible ». Cette norme se limite aux biocombustibles solides provenant des sources suivantes : produits de l'agriculture et de la sylviculture, déchets végétaux agricoles et forestiers, déchets végétaux provenant du secteur de la transformation alimentaire, déchets de bois, à l'exception de ceux susceptibles de contenir des composés organiques halogénés ou des métaux lourds à la suite d'un traitement de préservation ou de finition, y compris en particulier, les déchets de bois de ce type provenant de déchets de construction ou de démolition, déchets végétaux fibreux provenant de la production de pâte vierge et de papier issu de pâte, à condition d'être co-incinérés sur le lieu de production et que la chaleur générée soit récupérée, déchets de liège.

A titre d'information, la classification des biocombustibles solides de la norme NF EN ISO 17225-1 est fournie dans le tableau ci-après.

1. Biomasse ligneuse	1.1 Bois de forêt, de plantation et autres matériaux ligneux vierges	1.1.1 Arbres entiers sans racines	1.1.1.1 Feuillus 1.1.1.2 Conifères 1.1.1.3 Taillis à courte rotation 1.1.1.4 Buissons 1.1.1.5 Assortiments et mélanges
		1.1.2 Arbres entiers avec racines	1.1.2.1 Feuillus 1.1.2.2 Conifères 1.1.2.3 Taillis à courte rotation 1.1.2.4 Buissons 1.1.2.5 Assortiments et mélanges
		1.1.3 Grumes	1.1.3.1 Feuillus avec écorce 1.1.3.2 Conifères avec écorce 1.1.3.3 Feuillus sans écorce 1.1.3.4 Conifères sans écorce 1.1.3.5 Assortiments et mélanges
		1.1.4 Rémanents forestiers	1.1.4.1 Feuillus récemment exploités/verts (y compris feuilles ou aiguilles) 1.1.4.2 Conifères récemment exploités/verts (y compris feuilles ou aiguilles) 1.1.4.3 Stockés, feuillus 1.1.4.4 Stockés, conifères 1.1.4.5 Assortiments et mélanges
		1.1.5 Souches/racines	1.1.5.1 Feuillus 1.1.5.2 Conifères 1.1.5.3 Taillis à courte rotation 1.1.5.4 Buissons 1.1.5.5 Assortiments et mélanges
		1.1.6 Écorce (issue d'opérations forestières)	
		1.1.7 Bois trié provenant de jardins, de parcs, de l'entretien des chaussées, de vignes, de vergers et de bois flotté provenant d'eau douce	
		1.1.8 Assortiments et mélanges	
	1.2 Produits dérivés et sous-produits de l'industrie de transformation du bois	1.2.1 Produits dérivés et sous-produits du bois non traités chimiquement	1.2.1.1 Feuillus avec écorce 1.2.1.2 Conifères avec écorce 1.2.1.3 Feuillus sans écorce 1.2.1.4 Conifères sans écorce 1.2.1.5 Écorce (issue d'opérations industrielles)
		1.2.2 Produits dérivés, sous-produits, fibres et composants du bois traités chimiquement	1.2.2.1 Sans écorce 1.2.2.2 Avec écorce 1.2.2.3 Écorce (issue d'opérations industrielles) 1.2.2.4 Fibres et composants du bois
		1.2.3 Assortiments et mélanges	
	1.3 Bois usagé	1.3.1 Bois usagé non traité chimiquement	1.3.1.1 Sans écorce 1.3.1.2 Avec écorce 1.3.1.3 Écorce
		1.3.2 Bois usagé traité chimiquement	1.3.2.1 Sans écorce 1.3.2.2 Avec écorce 1.3.2.3 Écorce
		1.3.3 Assortiments et mélanges	
1.4 Assortiments et mélanges			

5 RISQUES LIÉS À LA BIOMASSE

Le danger principal des biomasses servant à alimenter les chaudières est lié à :

- leur caractère combustible ; elles peuvent donc être le siège d'un incendie en cas de présence d'une source d'inflammation, d'un auto-échauffement ou d'une auto-inflammation ;
- l'explosivité de leurs poussières.

Il est à noter que certains combustibles (ex. paille de céréales) peuvent contenir des composés tels que le chlore (1% pour la paille de céréales) qui peut conduire à des émissions de HCl et favoriser la corrosion chimique en voie humide (ce type de risque n'a pas été étudié dans le présent guide).

5.2 L'AUTO-ÉCHAUFFEMENT DE LA BIOMASSE PAR RÉACTION D'OXYDORÉDUCTION

L'auto-échauffement d'un produit, qui se produit dans certaines conditions de stockage, résulte de réactions d'oxydoréduction exothermiques impliquant ou non l'oxygène de l'air ambiant, avec la caractéristique que la production de chaleur est plus rapide que la dissipation de cette même chaleur en raison de la faible conductivité thermique du stockage : les conditions de dépôt ou de stockage d'une substance combustible font que la chaleur dégagée par les réactions d'oxydation n'est pas intégralement dissipée par les échanges thermiques entre le système réactionnel et le milieu extérieur. Il se produit une élévation de température du dépôt (auto-échauffement) et une accélération du phénomène d'oxydation. Cette augmentation de la température augmente la vitesse d'oxydation selon la loi d'Arrhenius et, par conséquent, le dégagement de chaleur est accru en raison du gradient de température plus important. Il en résulte alors soit un état stationnaire où toute la chaleur est évacuée vers l'extérieur, soit un emballement de l'auto-échauffement de la substance combustible dans la mesure où les réactions d'oxydation ne sont pas freinées par défaut d'oxygène et que les réactions d'abord lentes s'accroissent progressivement en échauffant la substance combustible. Dans ce dernier cas, de combustion lente et sans flamme au départ, le phénomène peut s'emballer et évoluer vers une combustion vive du dépôt, s'accompagnant d'une flamme ou au moins d'incandescences : l'auto-échauffement peut ainsi déclencher un incendie par le processus d'auto-inflammation.

Ces incendies en dépôt se caractérisent par le fait qu'ils sont difficiles à éteindre puisqu'il est difficile de les détecter suffisamment tôt, qu'ils se développent au sein du stockage et qu'ils peuvent toucher d'importants volumes de produits.

Les réactions de combustion initiées par le phénomène d'auto-échauffement peuvent se produire avec ou sans flamme. La combustion sans flamme (incandescence, feu couvant) peut alors éventuellement dégénérer en combustion avec flamme en fonction de la nature du produit et des conditions locales de ventilation et de diffusion d'air.

Tous les solides pulvérulents et oxydables peuvent subir cette réaction d'oxydo-réduction et s'échauffer spontanément dans certaines conditions de stockage. Les matières combustibles réagissent avec l'oxygène de l'air dès la température ordinaire avec une vitesse d'oxydation ou de pyrolyse d'autant plus grande que ces matières ont une granulométrie plus fine et donc une surface d'échange spécifique plus élevée.

L'auto-échauffement dépend également de la présence des composés oxydables et particulièrement des acides gras insaturés facilement oxydables qui dépendent du type de biomasse. Selon l'oxydabilité de la substance, le phénomène d'emballement peut démarrer dès la température ambiante ou seulement à partir d'une température supérieure à l'ambiante. De plus, la vitesse d'oxydation est d'autant plus rapide que la surface de contact d'un corps oxydable avec l'air est importante et que la température de ce corps est élevée.

Les principaux facteurs qui influencent le phénomène d'auto-échauffement sont :

- la température du produit stocké, qui détermine la cinétique de production de chaleur par oxydation ou par d'autres phénomènes thermo-dépendants (fermentation, condensation),
- la teneur en humidité, les conditions climatiques,
- les dimensions du stockage (aspects liés aux échanges thermiques),

- la durée de stockage de la biomasse (notamment des durées anormalement plus longues suite à, par exemple, la perte des moyens de transfert de la biomasse depuis le stockage vers la trémie d'alimentation de la chaudière),
- la quantité de produits étrangers.

La biomasse solide en morceaux ont une tendance à s'auto-enflammer lorsqu'ils sont stockés. Cette tendance augmente pour les produits imprégnés d'huile végétale ou animale, de colle, colorants organiques, etc. qui ont une cinétique d'oxydation plus vive que la biomasse.

Ces réactions d'oxydoréduction peuvent conduire au dégagement de gaz de pyrolyse et de combustion, en particulier, dans des conditions de sous-oxygénation, du CO. L'accumulation de CO dans le silo où la biomasse est stockée et où la réaction d'oxydoréduction se produit crée un risque d'explosion et un risque toxique.

Par ailleurs, l'incendie ou l'autoéchauffement peut également constituer la source d'inflammation d'un nuage de poussières, si un tel nuage se forme à proximité du dépôt en cours de combustion.

Inflammation de gaz de pyrolyse d'un dépôt de produits pulvérulents conduisant à une explosion

Lorsqu'un produit pulvérulent en dépôt se trouve exposé à une élévation de température soit du fait d'un auto-échauffement soit parce qu'il se trouve sur une surface chaude, celui-ci peut produire des gaz de pyrolyse. Ces gaz subissent une combustion en présence de l'oxygène de l'air mais ils peuvent également s'accumuler et conduire à la formation d'une ATEX gazeuse (zone ATEX 2). L'échauffement à l'origine de la pyrolyse ou une autre source d'énergie ponctuelle (étincelle mécanique ou électrique, point chaud) peut alors enflammer cette ATEX et conduire à une explosion ou un incendie.

Cas du bois

Le bois, soumis à un échauffement continu, forme un produit carboné qui risque de s'auto-enflammer à basse température.

Les sciures de bois, les copeaux de bois ont une tendance à s'auto-enflammer lorsqu'ils sont stockés.

Cette tendance varie avec la température, l'humidité, la durée de stockage, la présence de corps étrangers mais aussi avec l'espèce de bois.

Le rapport oméga 11 de l'INERIS sur la connaissance des phénomènes d'autoéchauffement des solides combustibles indique qu'il existe de grandes disparités entre les essences de bois en termes de réactivité vis-à-vis d'un tel phénomène.

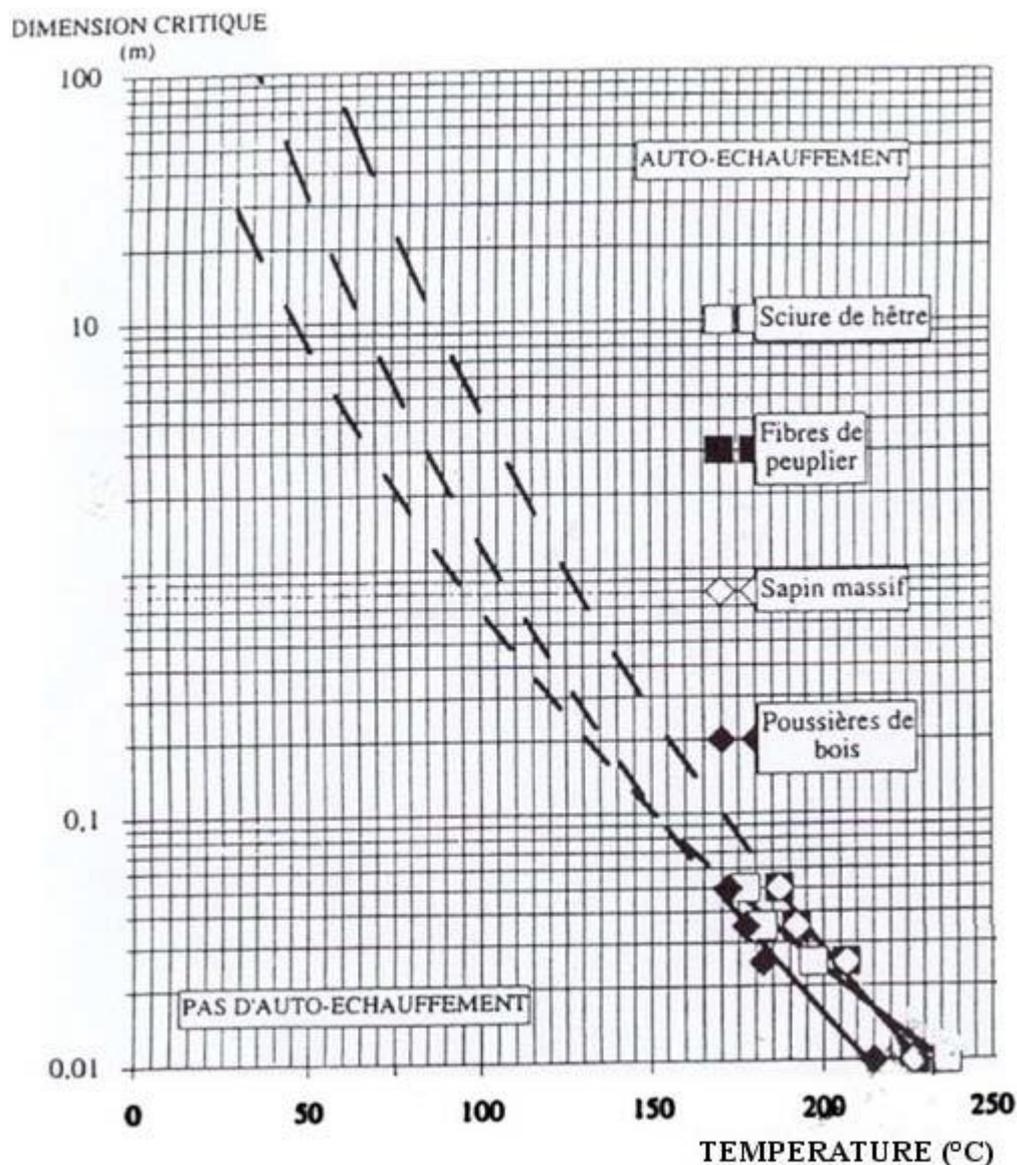


Figure 2 : Relation entre la température et la dimension critique d'un stockage de différentes essences et présentations de bois

La figure 2 indique que les poussières de bois sont les plus réactives vis-à-vis du phénomène d'auto-échauffement. En se basant sur ces données génériques issues de la littérature, nous pouvons estimer des températures critiques suivantes (à considérer avec prudence cependant car seul un essai en étuve isotherme peut fournir des données fiables sur les grandeurs critiques (température, dimension) d'un produit) :

- la température critique d'auto-échauffement du combustible dans le silo (hauteur de stockage maximum de 15 m) est de 60 °C ;
- la température critique d'auto-échauffement du combustible dans la trémie d'alimentation (hauteur de 2m) est de 120 °C.

Dès lors que la température du combustible dans ces équipements dépasse la température critique, le phénomène d'auto-échauffement commence à s'activer, ce qui conduit à une augmentation irréversible lente puis progressive du combustible (selon une croissance exponentielle, la vitesse d'auto-échauffement doublant tous les 10°C) selon les principales phases suivantes :

- augmentation jusqu'à 100°C : observation de vapeur d'eau relative à l'évaporation de la teneur en humidité contenue dans la matière,
- augmentation du produit jusqu'à 150°C et début de la phase de pyrolyse du combustible,
- plage de pyrolyse, phénomène d'oxydation du produit en teneur réduite d'oxygène (150°C – 400°C) avec génération et accumulation de CO dans le ciel de l'équipement pouvant présenter un risque de formation d'une ATEX air / CO,
- plage de thermolyse (phénomène de dégradation thermique pouvant atteindre 800°C avec formation de charbon et de gaz inflammable (CH₄, H₂...)).

La cinétique du phénomène d'auto-échauffement doit être reliée à la durée du stockage. C'est ainsi que des notions de stockage de longue durée (plusieurs jours) peuvent être déterminées pour différents types de combustibles. Il s'agit de périodes au-delà desquelles le risque d'auto-échauffement devient important.

5.3 LA FERMENTATION AÉROBIE DE LA BIOMASSE

La fermentation résulte de la présence de micro-organismes.

L'action oxydante de micro-organismes sur les matières organiques telles que la biomasse fournit souvent la chaleur initiale qui peut éventuellement conduire au stade de l'auto-échauffement. La fermentation est exothermique et peut conduire, par accumulation de la chaleur produite, à des températures avoisinant les 70°C – 80°C. La fermentation seule ne peut conduire à un auto-échauffement suffisant pour provoquer un incendie. Par contre, C'est une source d'échauffement qui peut être relayée à partir de 70°C environ par une oxydation qui elle peut provoquer l'auto-échauffement chimique et conduire à l'auto-inflammation.

Le phénomène d'auto-échauffement dans ces matériaux est complexe selon leurs natures spécifiques et également les influences externes auxquels sont sujets les produits tels le degré d'humidité, la granulométrie, les conditions de transport et de stockage. Le danger réel de l'auto-échauffement se présente souvent lorsque la biomasse est humide et stockée dans des grandes capacités de stockage.

Le tableau ci-après détaille les conditions favorisant la fermentation aérobie de la biomasse :

Paramètres	Condition de fermentation aérobie
Matrice	Matrices solides dont la granulométrie est comprise entre quelques mm à quelques cm (cas d'un agent structurant correspondant à des copeaux ou sciures de bois)
Milieu aérobie non méthanogène	Présence d'air en contact de la matrice
Température	35°C (température optimale d'activation des micro-organismes en voie mésophile)
Humidité	A partir de 20 %
Temps de séjour	Minimum de l'ordre de quelques semaines

Tableau 5 : Conditions favorisant la fermentation aérobie

La fermentation d'une substance solide combustible peut démarrer, en présence d'air, dans des stockages divisés et humides.

A des valeurs d'humidité relative au-dessous de 95 %, il n'existe pas de dégradation biologique conséquente. Les champignons se développent à partir d'une humidité relative supérieure à 75 %, bien que la plupart des bactéries se développent à partir d'humidité relative au-delà de 95 %.

Lorsque l'humidité relative approche 100 %, une montée rapide de la conductivité thermique due à la vapeur d'eau est observée. Ce phénomène favorise le transfert de chaleur et par conséquent, les réactions biochimiques atteignent une limite maximale de température de 76°C. La conductivité thermique de produit humide et poreux entre 60°C – 100°C est principalement contrôlée par la chaleur latente de condensation de l'eau. Aux humidités relatives proches de 100 %, la conductivité thermique de produit poreux humide montre une rapide élévation de température. Ainsi, une réaction chimique dégageant une faible chaleur favorisera la montée de température pour une humidité relative au-dessous de 100%.

Il semble donc que la limite de température inhérente aux phénomènes biologiques peut être dépassée seulement pour les produits en équilibre avec l'humidité relative de 95 % – 97%.

La cinétique de la réaction est lente et il faut plus d'un mois pour que la réaction puisse être mise en évidence. Aussi, seules des durées de stockage de plusieurs semaines (mouvement de grève, blocage ou casse du système d'extraction de la biomasse du silo) pourraient favoriser l'apparition de réaction de fermentation en voie aérobie et augmenter progressivement la température de la biomasse de l'ordre de 70°C. Les températures optimales d'activation des réactions de fermentation se situent autour de 35°C⁴.

5.4 L'EXPLOSION DE POUSSIÈRES DE COMBUSTIBLES PULVÉRULENTS

Certains produits combustibles peuvent être sous forme de poussières (notamment poussières de bois). Sous forme pulvérulente, ils peuvent générer un nuage de poussière lors de mise en suspension de poussières (notamment lors de jetées de copeaux de bois).

⁴ Oméga 11, INERIS-DRA-2005-46055 Connaissance des phénomènes d'auto-échauffement des solides combustibles

Pour caractériser la violence d'explosion des poussières, on distingue 3 classes d'explosion pour les poussières, telles que consignées dans le tableau ci-après. Chaque classe d'explosion est caractérisée par ses valeurs limites de K_{st} ⁵. Plus le K_{st} est élevé plus, l'explosion sera violente.

Classes d'explosion	K_{st} en bar.m.s ⁻¹
St 1	0 à 200
St 2	200 à 300
St 3	> 300

Tableau 6 : Classes d'explosion en fonction du K_{st}

Les poussières sont susceptibles de **générer des nuages de poussières** en cas de mise en suspension de poussières inflammables (de granulométrie médiane suffisamment fine de l'ordre 300µM 500 µm) qui en présence d'une source d'inflammation peuvent conduire à une **explosion**.

Il est à noter que seules les fines particules (de granulométrie inférieure à environ 500 µm) mises en suspension dans l'air et confinées participent à la formation d'un nuage de poussières : en effet, lors de la mise en suspension de poussières de bois (point de jetée, ciel de la trémie, dans le silo), les fines particules présentes restent plus longtemps en suspension. Il est nécessaire d'atteindre une concentration minimale de l'ordre de 30 g/m³ de fines particules (ce qui peut revenir à une concentration de quelques centaines de g/m³ de poussières de bois en considérant le mélange de grosses particules et de particules fines) pour que l'atmosphère se situe dans le domaine d'explosivité. La concentration maximale est de plusieurs kg/m³. Une faible quantité de fines particules mises en suspension avec une quantité importante de grosses particules (de granulométrie supérieure à 500 µm) n'entraîne pas un risque de formation d'un nuage de poussières.

⁵ La violence des explosions de poussières est caractérisée par la surpression maximale d'explosion et la vitesse maximale de montée en pression. La surpression maximale d'explosion notée P_{max} est la pression maximale développée par l'explosion d'un nuage de poussières dans une enceinte fermée à une concentration donnée. La vitesse d'accroissement de la pression (dP/dt) atteint une valeur maximale (dP/dt)_m au cours de l'explosion. A partir de cette valeur maximale de la variation de montée en pression, est calculé le coefficient de violence d'explosion (K_{st}) : $K_{st} = (dP/dt)_m \times V^{1/3}$. Ce coefficient de classer les poussières en 4 catégories en vue de la protection des enceintes par des événements, notées St_0 , St_1 , St_2 et St_3 .

Classe d'explosion	K_{st}
St_0	0
St_1	$1 < K_{st} \leq 200$
St_2	$200 < K_{st} \leq 300$
St_3	$300 < K_{st}$

Pour atteindre la concentration minimale nécessaire à la formation d'un nuage de poussières, il est communément admis qu'une couche de poussières de l'ordre du millimètre d'épaisseur seulement, déposée uniformément sur une surface de 1 m², suffit pour former un nuage de poussières par la mise en suspension de cette poussière sur une hauteur de 1 m. Il est également considéré qu'un risque de formation d'un nuage de poussières peut exister lors de mise en suspension de dépôts au sol d'épaisseur de 5 mm.

Pour enflammer un nuage de poussières combustibles, il faut qu'une quantité suffisante d'énergie lui soit apportée localement par une source d'inflammation.

L'énergie minimale d'inflammation (EMI) dépend de la nature du combustible et aussi de la composition du nuage de poussières et elle est minimale pour une composition voisine de la composition stœchiométrique.

Pour les plaquettes de bois forestières, par exemple, les caractéristiques d'inflammabilité et d'explosibilité sont les suivantes :

- Concentration minimale d'explosivité : de l'ordre 30 g/m³ ;
- Températures d'auto-inflammation : de l'ordre de 450°C en nuage et 340°C en couche ;
- Énergie Minimale d'Inflammation (EMI) : de l'ordre de 25 à 100 mJ.

La protection des installations contre les effets des explosions nécessite de prendre en compte, entre autres, la violence d'explosion (K_{St} et P_{max}) du produit mis en œuvre. Pour les plaquettes de bois forestières, les contenant des fines, la violence d'explosion de poussière est caractérisée par une classe d'explosion ST1.

Ces données issues de la littérature devront être confirmées par des essais de détermination des caractéristiques d'inflammabilité et d'explosibilité d'un échantillon issu du procédé.

Notes :

- Lorsque des gaz inflammables sont générés (pyrolyse, fermentation ou oxydation partielle), le risque d'explosion de gaz est également à considérer (dégagement de CO).
- Certains combustibles peuvent avoir une réactivité plus importante en raison de la présence de corps gras.
- Pour une installation donnée, deux cas d'explosion peuvent être étudiés :
 - une explosion dans un volume ou un équipement, explosion dite « primaire »,
 - ou une explosion dans un volume faisant suite à une propagation. On parle d'explosion secondaire lorsque l'explosion primaire qui se propage rencontre un nuage ou un dépôt de poussières, et enflamme ceux-ci, créant ainsi une nouvelle explosion (dite « secondaire »).

2. Biomasse herbacée	2.1 Biomasse herbacée provenant de l'agriculture et de l'horticulture	2.1.1 Cultures céréalières	2.1.1.1 Plante entière 2.1.1.2 Paille 2.1.1.3 Graines ou germes 2.1.1.4 Balles ou cosses 2.1.1.5 Assortiments et mélanges	
		2.1.2 Graminées	2.1.2.1 Plante entière 2.1.2.2 Paille 2.1.2.3 Graines 2.1.2.4 Cosses 2.1.2.5 Bambou 2.1.2.6 Assortiments et mélanges	
		2.1.3 Cultures d'oléagineuses	2.1.3.1 Plante entière 2.1.3.2 Pédoncles et feuilles 2.1.3.3 Graines 2.1.3.4 Balles ou cosses 2.1.3.5 Assortiments et mélanges	
		2.1.4 Racines	2.1.4.1 Plante entière 2.1.4.2 Pédoncles et feuilles 2.1.4.3 Racine 2.1.4.4 Assortiments et mélanges	
		2.1.5 Cultures de légumineuses	2.1.5.1 Plante entière 2.1.5.2 Pédoncles et feuilles 2.1.5.3 Fruits 2.1.5.4 Cosses 2.1.5.5 Assortiments et mélanges	
		2.1.6 Fleurs	2.1.6.1 Plante entière 2.1.6.2 Pédoncles et feuilles 2.1.6.3 Graines 2.1.6.4 Assortiments et mélanges	
		2.1.7 Biomasse herbacée triée provenant de jardins, de parcs, de l'entretien des chaussées, de vignes et de vergers		
		2.1.8 Assortiments et mélanges		
	2.2 Produits dérivés et sous-produits de l'industrie de transformation des herbacées	2.2.1 Sous-produits d'herbacées non traités chimiquement	2.2.1.1 Cultures céréalières et graminées 2.2.1.2 Cultures d'oléagineuses 2.2.1.3 Racines 2.2.1.4 Cultures de légumineuses 2.2.1.5 Fleurs 2.2.1.6 Assortiments et mélanges	
		2.2.2 Sous-produits d'herbacés traités chimiquement	2.2.2.1 Cultures céréalières et graminées 2.2.2.2 Cultures d'oléagineuses 2.2.2.3 Racines 2.2.2.4 Cultures de légumineuses 2.2.2.5 Fleurs 2.2.2.6 Assortiments et mélanges	
2.2.3 Assortiments et mélanges				
2.3 Assortiments et mélanges				
3. Biomasse fruitière	3.1 Fruits de vergers et issus de l'horticulture	3.1.1 Baies	3.1.1.1 Baies entières 3.1.1.2 Pulpe 3.1.1.3 Graines 3.1.1.4 Assortiments et mélanges	
		3.1.2 Fruits à noyaux/à amandes	3.1.2.1 Fruits entiers 3.1.2.2 Pulpe 3.1.2.3 Noyaux/amandes/fibres de fruits 3.1.2.4 Assortiments et mélanges	
		3.1.3 Noix et glands	3.1.3.1 Noix entières 3.1.3.2 Cosses/balles 3.1.3.3 Amandes 3.1.3.4 Assortiments et mélanges	
		3.1.4 Assortiments et mélanges		
	3.2 Produits dérivés et sous-produits de l'industrie de transformation des fruits	3.2.1 Sous-produits de fruits non traités chimiquement	3.2.1.1 Baies 3.2.1.2 Fruits à noyaux/à amandes/fibres de fruits 3.2.1.3 Noix et glands 3.2.1.4 Grignon d'olives brut 3.2.1.5 Assortiments et mélanges	
		3.2.2 Sous-produits de fruits traités chimiquement	3.2.2.1 Baies 3.2.2.2 Fruits à noyaux/à amandes 3.2.2.3 Noix et glands 3.2.2.4 Grignon d'olives épuisés 3.2.2.5 Assortiments et mélanges	
		3.2.3 Assortiments et mélanges		
3.3 Assortiments et mélanges				
4. Biomasse aquatique	4.1 Algues	4.1.1 Micro-algues (nom latin à préciser)		
		4.1.2 Macro-algues (nom latin à préciser)		
		4.1.3 Assortiments et mélanges		
	4.2 Jacinthe d'eau			
	4.3 Plantes issues de la mer et de lac	4.3.1 Plantes issues de lac (nom latin à préciser)		
		4.3.2 Plantes issues de la mer	4.3.2.1 Varech bleu (nom latin à préciser) 4.3.2.2 Varech vert (nom latin à préciser) 4.3.2.3 Varech bleu vert (nom latin à préciser) 4.3.2.4 Varech brun (nom latin à préciser) 4.3.2.5 Varech rouge (nom latin à préciser)	
		4.3.3 Assortiments et mélanges		
4.4 Roseaux	4.4.1 Roseau commun			
	4.4.2 Autres roseaux			
	4.4.3 Assortiments et mélanges			
4.5 Assortiments et mélanges				
5. Assortiments et mélanges	5.1 Assortiments			
	5.2 Mélanges			

Tableau 7 : Classification de l'origine et des sources de biocombustibles solides selon la norme 17225-1

Annexe C

Accidentologie des installations de chaufferie à biomasse y compris les installations de stockage et de convoyage

1 RECHERCHES EFFECTUÉES

L'étude accidentologique présentée dans cette annexe s'appuie sur la base des accidents recensés ARIA disponible sur le site du BARPI.

1.1 RECHERCHES EFFECTUÉES SUR LA BASE ARIA DU BARPI

Les requêtes effectuées dans la base ARIA du BARPI en date du 25/06/2018 sont indiquées dans le tableau ci-après, avec le nombre d'accidents obtenus. Elles conduisent à l'identification de 885 accidents, tous équipements confondus.

N° requête	Equipement concerné par la requête	Mots-clés +	Mots clés -	Nombre d'accidents
1	Préparation du combustible	tamis ; bois		10
2	Préparation du combustible	broyeur ; bois		59
3	Préparation du combustible	broyeur ; biomasse	bois	1
4	Préparation du combustible	trieur ; bois		14
5	Préparation du combustible	trieur ; biomasse	bois	1
6	silo	silo ; bois		380
7	silo	silo ; biomasse	bois	4
8	chaudière	chaudière ; biomasse		30
9	chaudière	chaudière ; bois	biomasse	105
10	chaudière	chaudière ; sciure	bois ; biomasse	13
11	chaudière	centrale thermique ; biomasse	chaudière	2
12	cendre	cendre ; biomasse		4
13	cendre	cendre ; bois	biomasse	12
14	élévateur	elevateur ; bois		58
15	élévateur	godet ; bois	élévateur	9
16	élévateur	elevateur ; biomasse	bois	18
17	élévateur	godet ; biomasse	bois ; élévateur	1
18	élévateur	transporteur ; chaine ; bois		3
19	transporteur à chaines	transporteur ; chaine ; biomasse	bois	0
20	transporteur à chaines	convoyeur ; chaine ; bois		3
21	transporteur à chaines	convoyeur ; chaine ; biomasse	bois	0
22	transporteur à chaines	redler ; bois		32
23	transporteur à chaines	redler ; biomasse	bois	1
24	transporteur à vis	vis ; biomasse		9
25	transporteur à vis	vis ; bois	biomasse	43
26	transporteur pneumatique	convoyeur ; pneumatique ; bois		3
27	transporteur pneumatique	convoyeur ; pneumatique ; biomasse	bois	0
28	Convoyeur à bande	convoyeur ; bande ; bois		41
29	Convoyeur	convoyeur ; bande ; biomasse	bois	1
30	Convoyeur	transporteur ; bande ; bois		3
31	Convoyeur	transporteur ; bande ; biomasse	bois	0

N° requête	Equipement concerné par la requête	Mots-clés +	Mots clés -	Nombre d'accidents
32	Convoyeur	bande ; bois	convoyeur ; transporteur	25
33	Convoyeur	bande ; biomasse	Bois ; convoyeur ; transporteur	0

Après retrait des accidents en doublons et analyse des accidents pertinents, 409 accidents sont conservés ; leurs numéros ARIA sont listés ci-après.

831	16201	24396	29823	33786	39096	43813	45957	48810
870	16338	24433	29862	33794	39159	43863	45982	48943
928	16600	24641	29955	33831	39247	43924	46106	48958
1139	17108	24738	29987	33928	39293	43964	46512	49093
1312	17432	24823	30024	34045	39383	44112	46591	49098
2053	17436	24862	30053	34099	39625	44204	46637	49113
2541	18223	24880	30074	34135	39788	44226	46648	49114
2803	18811	25381	30416	34138	39911	44289	46785	49119
3203	18910	25476	31074	34180	39955	44321	46834	49148
3381	19217	25490	31115	34283	40095	44440	46911	49149
3639	19343	25511	31187	34408	40297	44452	46946	49150
4207	19384	25805	31228	34439	40466	44479	47063	49154
4299	19424	26082	31268	34579	40603	44489	47076	49179
5072	19623	26730	31306	34751	40604	44506	47123	49180
5242	19676	26798	31323	34826	40691	44515	47252	49263
5884	20252	26920	31332	35457	40901	44567	47276	49360
6325	20263	26931	31374	35470	40975	44625	47297	49363
7401	20377	26955	31616	35499	41147	44626	47362	49376
7662	20380	26968	31775	35722	41787	44808	47366	49378
8311	20578	27099	31827	35751	41821	44823	47396	49485
8634	20579	27270	31838	35888	41900	45013	47437	49578
10012	20680	27502	31843	35979	42017	45036	47478	49714
10020	20852	27551	31894	35990	42023	45064	47530	49785
10075	21292	27843	31933	36212	42087	45089	47794	49817
10259	21615	27911	32161	36244	42187	45130	47837	50038
10441	21650	27919	32228	36286	42197	45219	47868	50167
11770	21676	28282	32234	36319	42205	45237	47890	50168
11781	21788	28522	32263	36359	42394	45243	47940	50270
12375	21957	28548	32296	36564	42615	45272	47947	50299
12518	22126	28663	32359	37211	42616	45329	47959	50342
12808	22141	28671	32598	37212	42780	45409	48008	50347
12903	22162	28714	32644	37422	42892	45434	48017	50374
13240	22204	28951	32662	37448	42949	45485	48021	50434
13725	22361	28990	32791	37486	42993	45552	48052	50519
14323	22365	29011	32811	37594	43083	45563	48149	50622
14537	22465	29084	32821	37622	43168	45564	48162	50673
14634	22558	29165	32854	37726	43227	45599	48241	50761
14686	22613	29251	32869	37839	43239	45618	48244	50770
15002	22980	29315	32874	37848	43244	45720	48468	50856
15053	23325	29404	32967	37955	43267	45726	48514	51007
15128	23711	29421	33012	38211	43272	45858	48531	51118
15398	23811	29460	33013	38383	43293	45868	48557	
15635	24088	29572	33105	38425	43473	45882	48560	
15689	24099	29759	33447	38507	43613	45896	48714	
15851	24251	29808	33610	38935	43619	45906	48778	
16111	24332	29816	33704	38993	43622	45940	48798	

Les accidents recensés ne proviennent que de ces recherches et que, pour les équipements de transfert et les silos en particulier, l'accidentologie issue d'autres industries et notamment du stockage de grains n'est pas intégrée dans cette analyse. Il est toutefois souligné que les causes d'accidents issues de ces secteurs sont complémentaires de celles mises en évidence dans cette analyse.

1.2 RÉPARTITION DES ACCIDENTS RETENUS PAR ÉQUIPEMENT

Différents équipements constituent le circuit de combustible dans une chaudière, du stockage à la gestion des cendres. Les différents blocs successifs considérés dans l'analyse sont les suivants :

- Préparation du combustible : il s'agit des équipements permettant le tamisage, le broyage, le tri des éléments de combustibles, afin de respecter les spécifications de qualité de combustible requises dans la chaudière
- stockage : il s'agit des aires de stockage à l'air libre ou sous abri et des silos utilisés pour stocker le combustible ;
- transfert du combustible : il s'agit des équipements permettant la manutention des combustibles tels que les convoyeurs (à bande, à chaînes, pneumatique, à godets) ainsi que les trémies d'alimentation qui constituent le dernier maillon avant l'introduction dans le foyer de la chaudière ;
- dépoussiérage : il s'agit des filtres et systèmes d'aspiration permettant de récupérer les poussières de combustible dans les différentes équipements ;
- chaudière : il s'agit essentiellement du foyer de la chaudière (hors traitement des fumées et de l'eau) ;
- gestion des cendres : ce terme regroupe la partie filtration et le stockage des cendres volantes, ainsi que le transfert et le stockage des cendres humides générées par la chaudière.

Le tableau ci-après indique la répartition de ces accidents selon les équipements qu'ils concernent. Il est à noter que, d'une part, les équipements utilisés en mot clé dans la quête sur la base ARIA ne conduisent pas toujours à des accidents les concernant et, d'autre part, certains accidents concernent plusieurs équipements en raison de la propagation du phénomène dangereux.

Étiquettes de lignes	Répartition des équipements concernés
broyeur	15
broyeur+convoyeur à bande	3
broyeur+silo	6
broyeur+stockage	4
broyeur+tamis+silo	2
chaudière	17
chaudière	1
chaudière -sas de transfert	1
chaudière+silo	2
convoyeur à bande	17
convoyeur à bande + silo	3

Étiquettes de lignes	Répartition des équipements concernés
convoyeur+élévateur+silos	1
dépoussiérage	13
dépoussiérage+silos	9
élévateur à godets	3
élévateur à godets + silo	1
générateur de vapeur	1
injection de biomasse	1
séchoir	10
séchoir+convoyeur+silos	2
séchoir+silos	3
séchoir+tamis	1
silos	243
stockage aérien	25
stockage aérien+convoyeur à bandes	1
stockage des cendres	3
tamis	1
tamis+silos	1
transporteur à chaînes	1
transporteur à vis	4
transporteur à vis + silos	3
transporteur à vis+ stockage aérien	1
trémie d'alimentation de la chaudière	4
trieur	1
trieur+silos	5
(vide)	
Total général	409

Figure 1 : Répartition des accidents selon les équipements concernés

Du fait de la présence d'équipements en série, il n'est pas rare qu'un accident se propage à travers le circuit de combustible, touchant ainsi plusieurs équipements. Ainsi environ 10% des accidents recensés dans l'échantillon ont touché plusieurs équipements.

Plus de la moitié des accidents concernent le stockage. En revanche, les accidents relatifs à la chaudière en elle-même sont très peu nombreux.

Le diagramme ci-après indique la répartition de ces accidents selon le type d'équipement concerné.

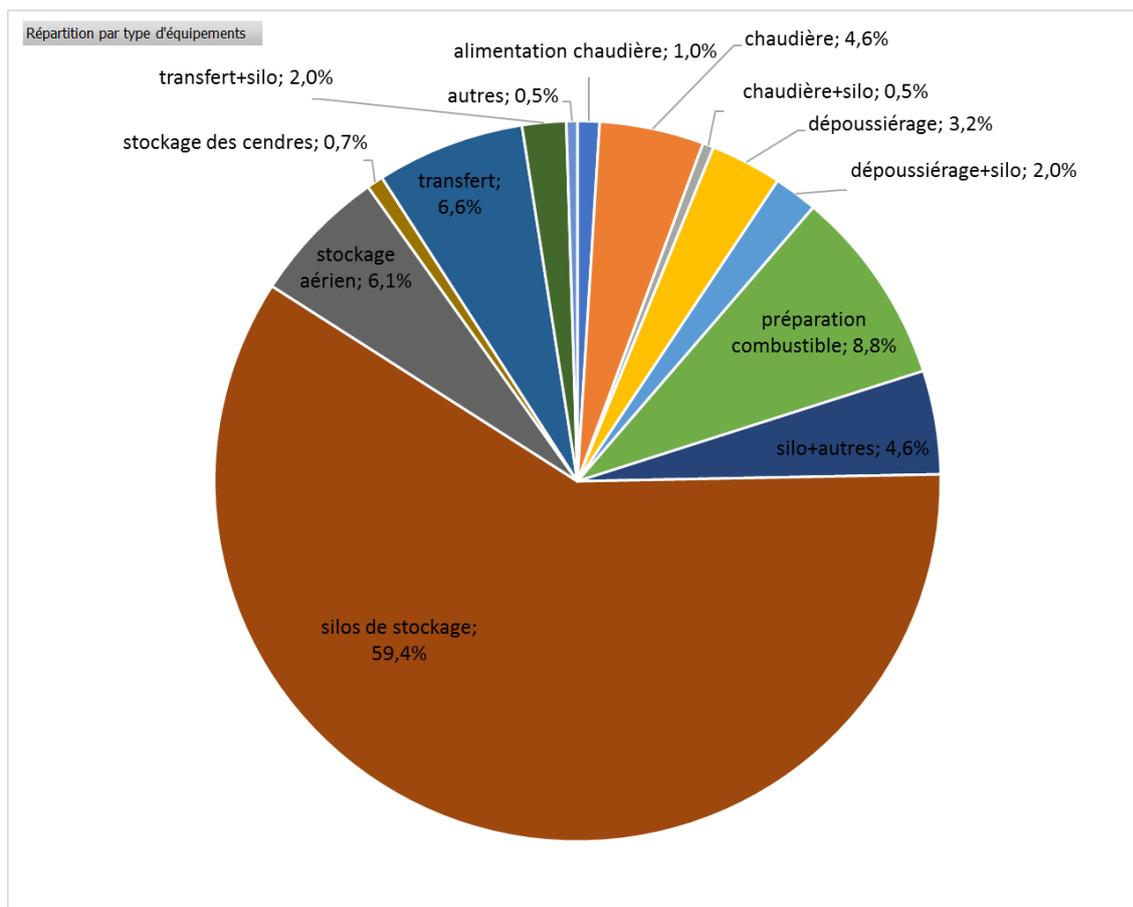


Figure 2 : Répartition des accidents en fonction des équipements présents dans le procédé

1.3 RÉPARTITION DES ACCIDENTS RETENUS PAR COMBUSTIBLE

Le diagramme ci-après indique la répartition de ces accidents selon le combustible concerné.

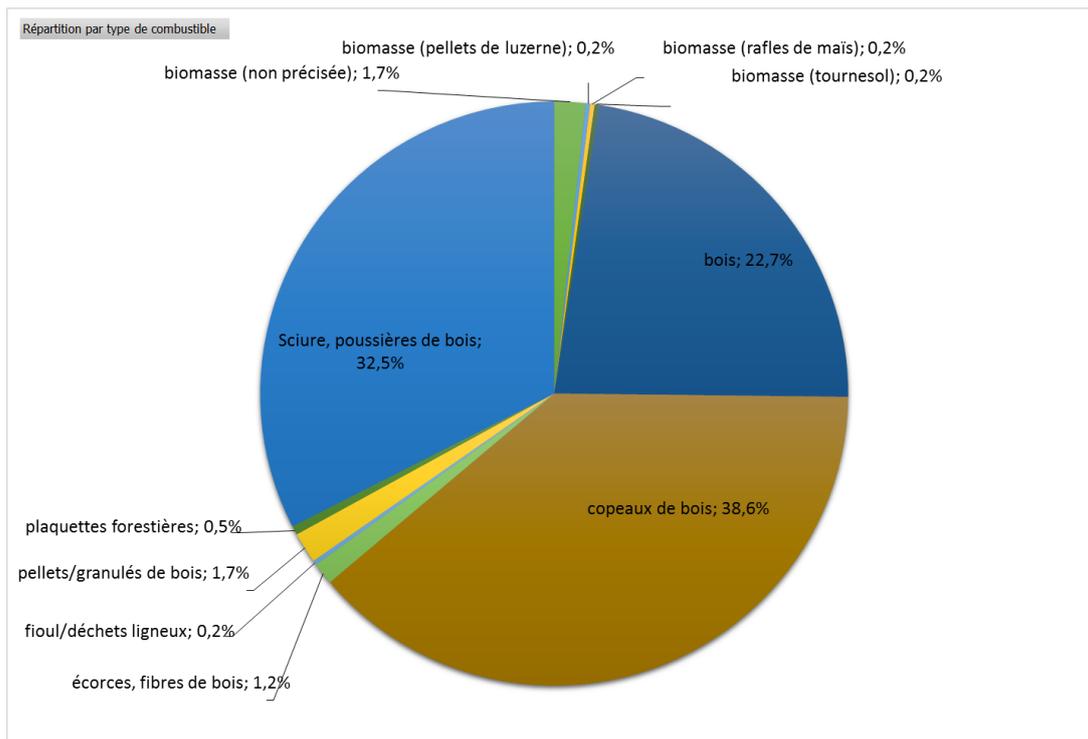


Figure 3 : Répartition des accidents par type de combustibles

La biomasse la plus concernée par l'accidentologie est le bois ou ses dérivés (granulés, pellets, sciures, etc.), ce qui s'explique notamment par le fait qu'elle correspond également au type de biomasse le plus utilisé.

1.4 RÉPARTITION DES ACCIDENTS RETENUS PAR PHÉNOMÈNE DANGEREUX

Le diagramme ci-après indique la répartition de ces accidents selon les phénomènes dangereux en résultant, en ne distinguant pas les équipements.

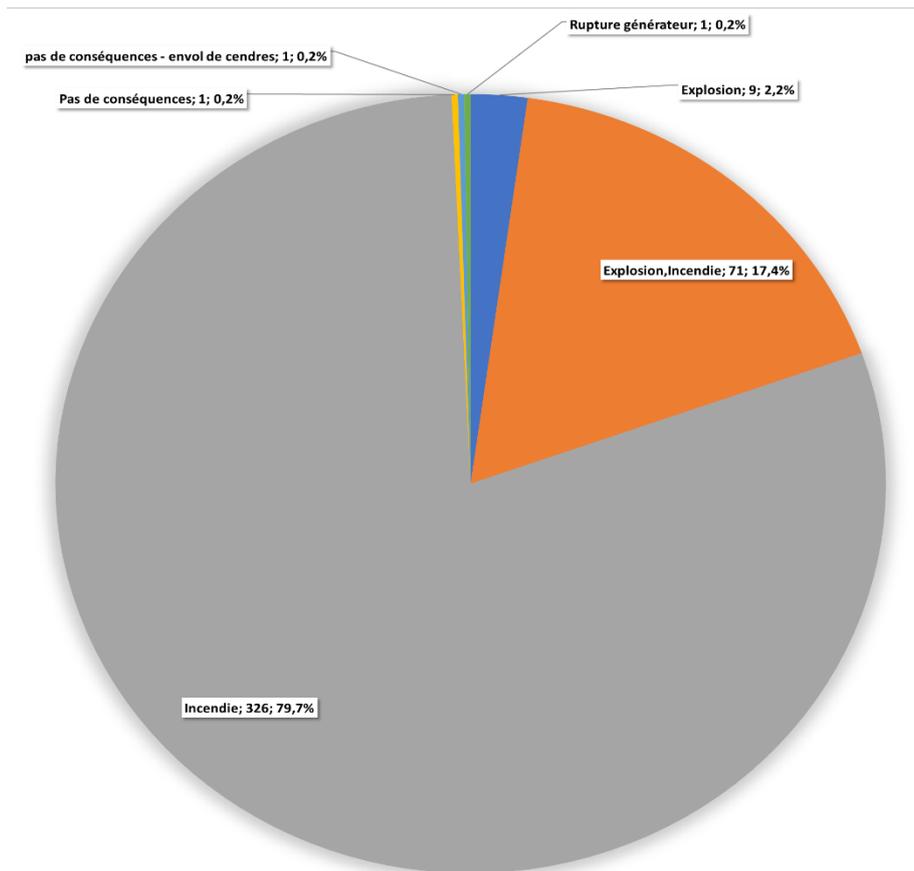


Figure 4 : Répartition des accidents par phénomènes dangereux, tous équipements confondus (chaque étiquette indique le phénomène dangereux, le nombre d'accidents concernés et le pourcentage représenté par ces accidents)

Les incendies correspondent au phénomène dangereux le plus représenté pour l'ensemble des équipements (79%) ; les phénomènes d'explosion suivie d'un incendie représentent 17% des accidents.

D'après le classement par typologie des conséquences, aucun de ces accidents n'a occasionné de décès à l'extérieur du site.

Le paragraphe suivant détaille les phénomènes dangereux et leurs causes selon le type d'équipement.

2 ANALYSE DES ACCIDENTS POUR CHAQUE ÉQUIPEMENT

2.1 PRÉPARATION DU COMBUSTIBLE

54 accidents concernent les installations de préparation de combustible. Parmi eux et en considérant que certains accidents concernent plusieurs installations de préparation de combustible compte tenu de la propagation de ces derniers :

- 30 concernent des broyeurs,
- 16 concernent des séchoirs,
- 5 concernent des tamis,
- 6 concernent des équipements de tri.

Les risques sont les risques d'incendie (34 incendies) et d'explosion (1 explosion seule et 19 explosions suivies d'incendie) :

- Dans le cas des broyeurs, 22 cas d'incendie sont observés et 8 explosions avec incendie ;
- Dans le cas des séchoirs, 8 cas d'incendie sont observés, 1 explosion et 7 explosions avec incendie ;
- Dans le cas des tamis, 1 cas d'incendie est observé et 4 explosions avec incendie ;
- Dans le cas des trieurs, 3 cas d'incendie sont observés et 3 explosions avec incendie.

Les causes principales de ces accidents sont :

- Pour les broyeurs :
 - L'encrassement et le mauvais nettoyage ;
 - Un défaut de nettoyage entraînant un encrassement du volet du broyeur ;
 - L'échauffement mécanique dû à la présence d'un corps étranger ;
 - L'échauffement mécanique d'un élément du capotage ;
 - L'échauffement de la bande transporteuse du broyeur ;
 - Une étincelle d'origine électrique ;
 - La surchauffe du moteur ;
 - L'aspiration dans le broyeur de particules incandescentes (provenance non précisée).

La répartition des accidents par cause pour cet équipement est fournie ci-après.

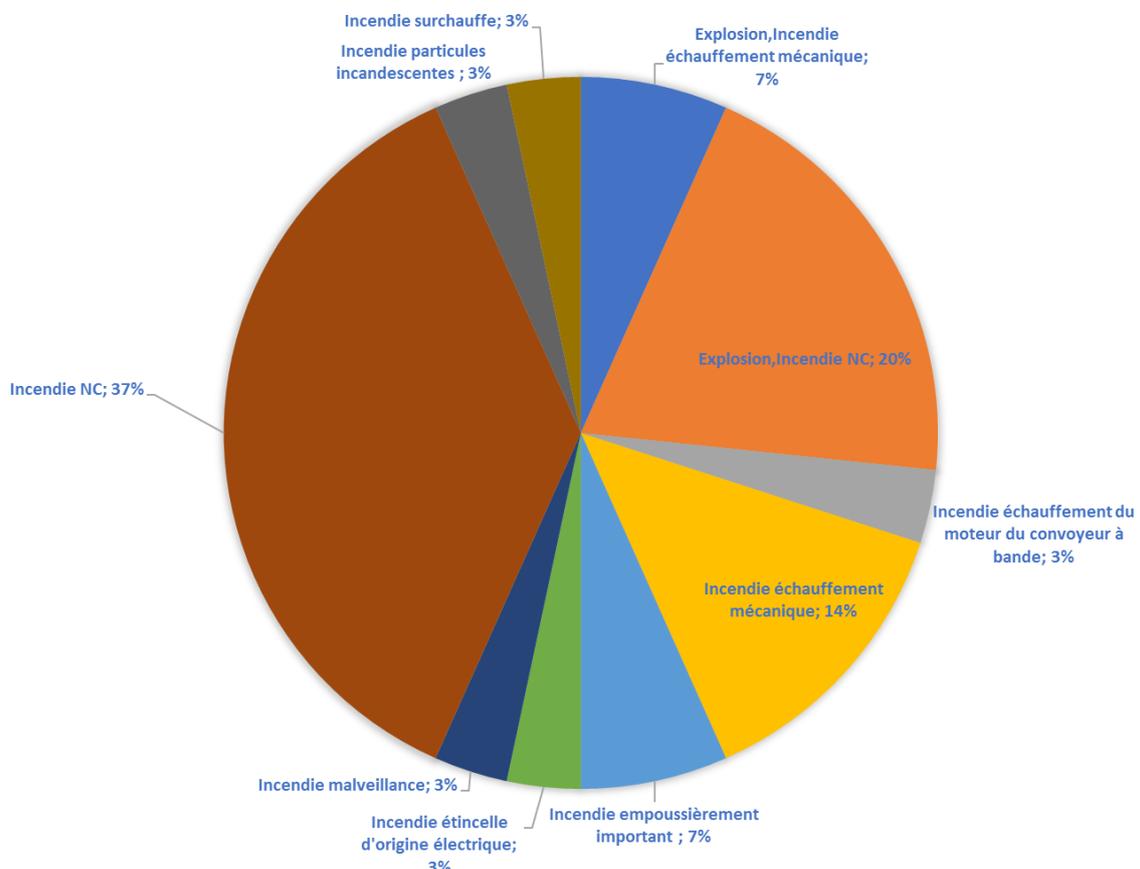


Figure 5 : Répartition des accidents des broyeurs selon les causes et les phénomènes dangereux

- Pour les séchoirs :
 - Une étincelle d'origine électrique ;
 - Une élévation de température (surchauffe) dans le séchoir notamment par manque de combustible ;
 - Un endommagement du séchoir conduisant à l'accumulation de braises dans le séchoir.

La répartition des accidents par cause pour ces équipements est fournie ci-après.

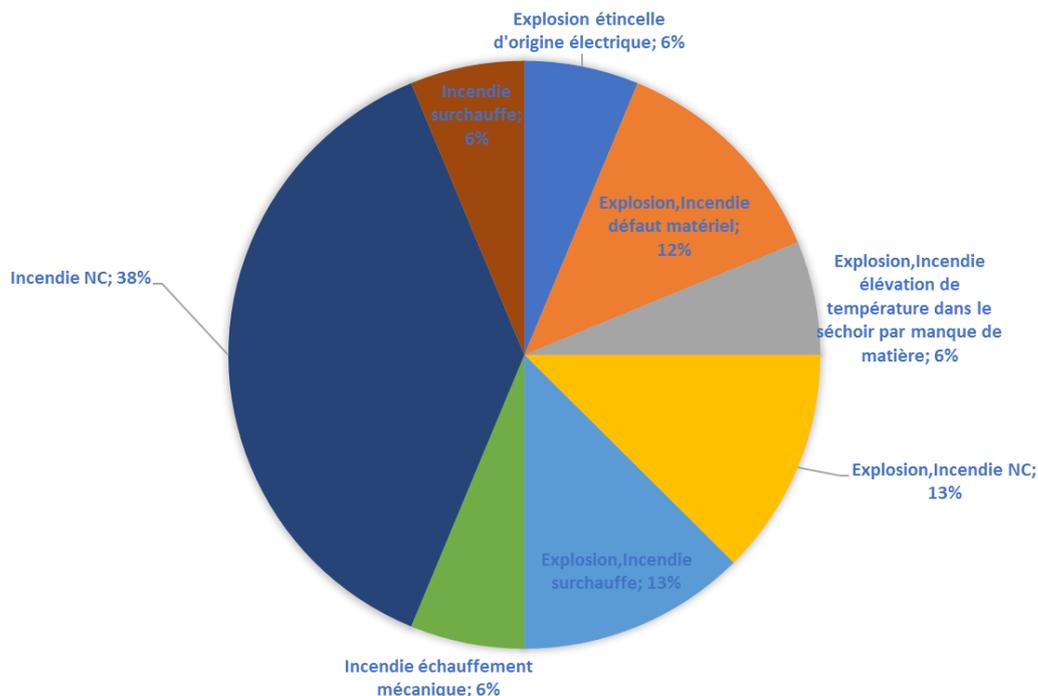


Figure 6 : Répartition des accidents des séchoirs selon les causes et les phénomènes dangereux

- Pour les installations de tri et de tamisage :
 - L'échauffement mécanique, notamment dû à la présence d'un corps étranger ;
 - L'échauffement en amont du combustible dans le séchoir entraîné ensuite dans ces équipements ;
 - L'échauffement mécanique d'un élément de l'équipement ;
 - Les travaux par points chauds.

La répartition des accidents par cause pour ces équipements est fournie ci-après.

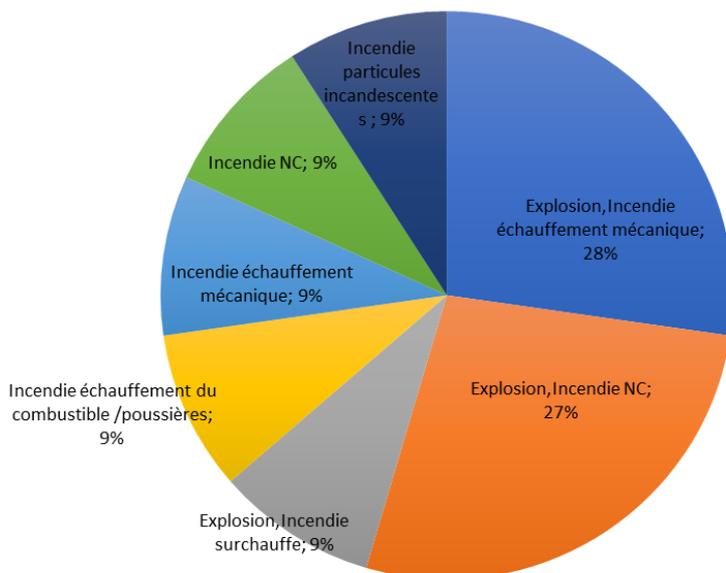


Figure 7 : Répartition des accidents des installations de tri et de tamisage selon les causes et les phénomènes dangereux

2.2 STOCKAGE DE COMBUSTIBLE

La recherche concernant les installations de stockage de combustible a été effectuée avec le mot clé « silo ». Cette recherche a permis d'identifier des accidents qui concernaient des silos de stockage, mais également des stockages à l'air libre.

- Pour les stockages à l'air libre, l'accidentologie n'est pas complète car aucune recherche avec des mots clés spécifiques aux stockages à l'air libre n'a été réalisée. Toutefois, la recherche avec le mot-clé « silo » a permis de recenser 25 accidents concernant des stockages à l'air libre. Ces accidents sont tous des incendies, dont les causes (quand elles sont indiquées) sont la fermentation de la biomasse ou des échauffements mécaniques conduisant à des étincelles qui enflamment les stockages. Il est souligné que dans sa lettre d'information n°49 de décembre 2017, le BARPI soulignait la fréquence croissante des incendies de tas de copeaux de bois ;
- 281 accidents concernant des silos de stockage de biomasse ont été recensés, dont 38 concernent à la fois des silos et d'autres équipements (transfert, préparation, chaudière). Ces derniers sont liés soit à des chaudières biomasse, soit à des stockages de combustible du même type que celui utilisé dans les chaudières biomasse (notamment silos de sciures dans les menuiseries).

Il est à noter que les descriptifs des accidents présentent rarement les caractéristiques de silos, en dehors du volume qui est très variable (de quelques dizaines de m³ à plusieurs centaines voire milliers de m³). En particulier, il est rarement précisé s'il s'agit d'un silo ouvert ou fermé.

277 accidents impliquant des silos de biomasse ont engendré des effets thermiques. Parmi ces 277 accidents, 53 ont également générés des effets de surpression (explosion et incendie).

4 accidents de silos de biomasse ont engendré des effets de surpression.

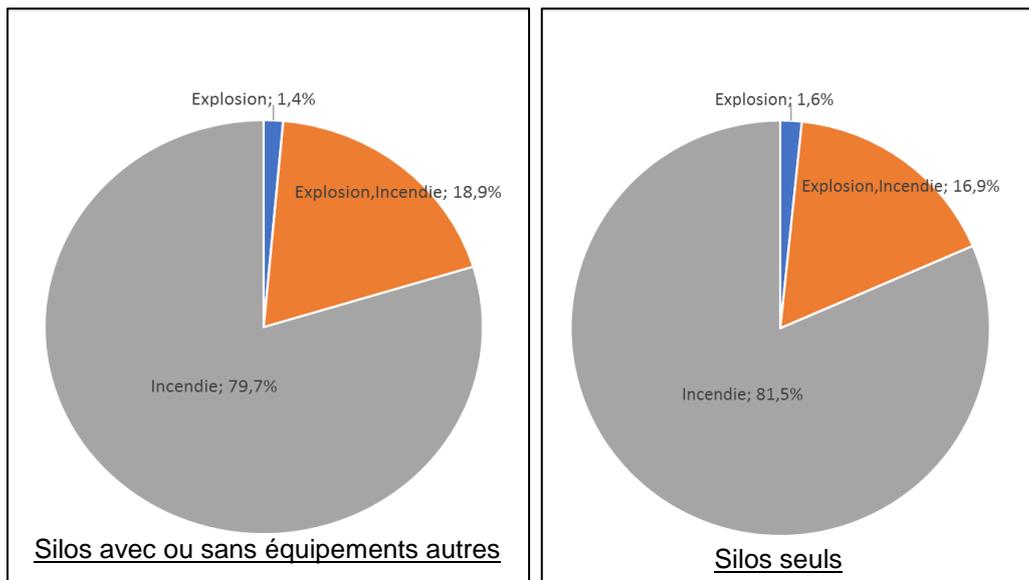


Figure 8 : Répartition des accidents par phénomènes dangereux, pour les silos avec ou sans équipements autres affectés par l'accident (graphe 1) et les silos seuls (graphe 2)

Dans la majorité des cas (168 accidents), les causes des accidents ne sont pas indiquées.

L'incendie est le phénomène dangereux principal (277 cas), avec pour cause :

- Une source d'inflammation provenant de la chaudière (pas de précision),
- Un défaut de conception mettant le silo en dépression et permettant la remontée d'air chaud de la chaudière vers le silo,
- Des défauts matériels sur l'extracteur du silo ou la vis sans fin,
- Le stockage de combustibles avec une température trop élevée (échauffés suite à l'arrêt du séchoir ou un mauvais réglage du séchoir, échauffement dans l'équipement de transfert),
- Un échauffement mécanique – frottements au niveau des équipements de transfert ou de préparation ou de dépoussiérage, le frottement de pièces métalliques, la présence de corps étranger, le frottement au niveau du mécanisme d'extraction en bas de silo,
- Des effets domino de propagation d'incendie d'autres équipements vers le silo,
- Une étincelle d'origine électrique,
- La fermentation,
- La foudre,
- La présence de particules incandescentes (bourrage, présence de corps étrangers, échauffement des copeaux),
- Une étincelle provenant de la chaudière,
- Les travaux par points chaud,
- Le retour de flamme de la chaudière,
- La surchauffe d'un équipement,
- La reprise de feu couvant provenant d'un premier incident ou se transformant en incendie.

Pour l'explosion, les causes recensées sont :

- Les travaux par points chaud,
- Le bourrage,
- Un échauffement mécanique – frottements au niveau des équipements de transfert ou de préparation ou de dépoussiérage, le frottement de pièces métalliques, la présence de corps étranger,
- La fermentation.

Le diagramme ci-après présente les causes des phénomènes dangereux, pour les incendies et explosions.

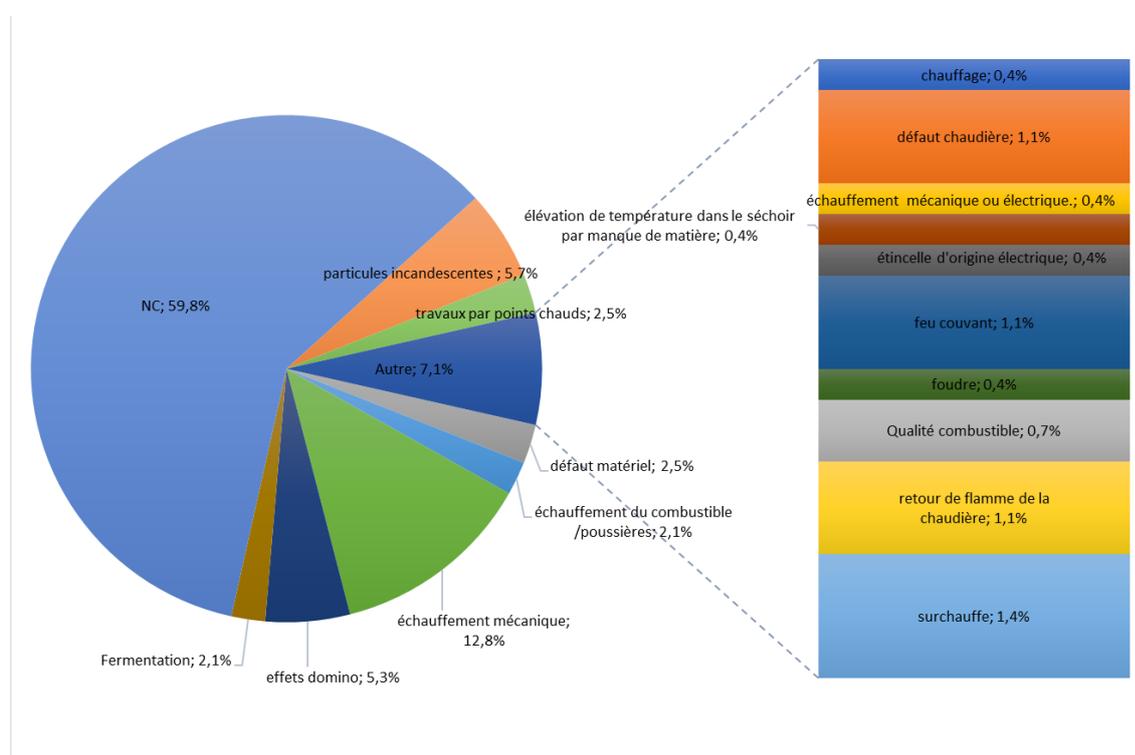


Figure 9 : Répartition des causes d'accidents des silos

Il est souligné que les causes mises en évidence ne concernent que les accidents recensés dans le cadre des requêtes rappelées au § 1.1.

Un flash information concernant les risques d'incendie et d'explosion dans les silos à bois a été publié par le BARPI en 2015¹ et figure en dernière partie de cette annexe. Il met en évidence les risques d'incendie et d'explosion, et les conséquences qui peuvent être des projections d'éclats, des écroulements de structure, une onde de souffle.

En plus de ces accidents, 4 accidents recensés concernent la trémie d'alimentation de la chaudière. Ce sont 4 incendies, dont les causes connues sont l'inflammation par une étincelle d'origine électrique et l'inflammation par un retour de flamme de la chaudière suite au dysfonctionnement de deux clapets entre la trémie et la chaudière.

1

https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/20150504_FLASH_SILODEBOIS.pdf

2.3 CHAUDIÈRES À BIOMASSE

Parmi les accidents recensés, 21 accidents concernent des chaudières à biomasse, dont 2 sont des explosions, 3 des explosions accompagnées d'incendies, 15 des incendies et 1 correspond à un échauffement de la chaudière uniquement. Il est à noter que les phénomènes dangereux exacts et la localisation des incendies ne sont pas bien décrits dans l'accidentologie (ex. incendie de chaudière, incendie du local chaudière, etc.). Parmi les accidents recensés, aucun n'a eu d'effets sur des personnes en dehors des limites de propriété.

Les causes recensées (15 accidents sur ces 21 ayant leurs causes précisées) sont :

- Pour les incendies :
 - Un court-circuit électrique (1 accident),
 - Un retour de flamme de la chaudière vers son alimentation (2 accidents),
 - Une fuite d'huile thermique de l'échangeur de la chaudière dans une armoire électrique (1 accident),
 - La présence de vapeurs d'huile et de paraffine (1 accident),
 - Un problème d'alimentation de la chaudière – sans autre précision (1 accident),
 - La projection de braises à travers une grille dans le calorifuge de la chaudière (1 accident),
 - Une fuite de fioul vers le circuit vapeur (chaudière biomasse/fioul) (1 accident),
 - La surchauffe de la chaudière (2 accidents),
 - Des effets dominos (1 accident),
 - Un mauvais mélange de biomasse dans la chaudière entre plusieurs types de biomasse de caractéristiques différentes (1 accident),
- Pour les explosions :
 - La présence d'eau dans le circuit primaire (1 accident),
 - L'accumulation de gaz dans le foyer dû à un mauvais tirage (1 accident),
 - Un coup de bélier (1 accident).

L'échauffement de la chaudière, quant à lui, est dû à une coupure d'eau.

Les chaudières sont souvent placées dans des bâtiments et l'incendie de la chaudière provoque l'incendie du bâtiment. 6 accidents répertoriés sont également des incendies de bâtiments, notamment avec :

- La surchauffe de la chaudière,
- Un retour de flamme de la chaudière au niveau de l'alimentation de la chaudière,
- La projection de braises dans le calorifuge qui a entraîné la fuite hydraulique d'un des vérins et / ou des flexibles sous l'effet de la chaleur. L'huile du vérin se serait alors enflammée.

2.5 EQUIPEMENTS DE TRANSFERT

40 accidents recensés concernent des équipements de transfert de biomasse. Parmi eux, 13 accidents impliquent également des installations de préparation (3 accidents) ou les silos (10 accidents).

Ces accidents correspondent à 33 incendies, 2 explosions et 5 explosions avec incendies. Ils se répartissent comme suit en fonction des équipements de transfert :

- 4 concernent des élévateurs à godets avec 1 explosion, 2 explosions avec incendie et 1 incendie,
- 1 incendie concerne un transporteur à chaînes,
- 8 concernent des transporteurs à vis, dont 1 explosion et 7 incendies,
- 27 concernent des convoyeurs à bande, dont 3 explosions avec incendie et 24 incendies.

Aucun accident sur un transporteur pneumatique de biomasse n'est mis en évidence.

La répartition des accidents par type d'équipement de transfert est donnée dans le diagramme ci-après

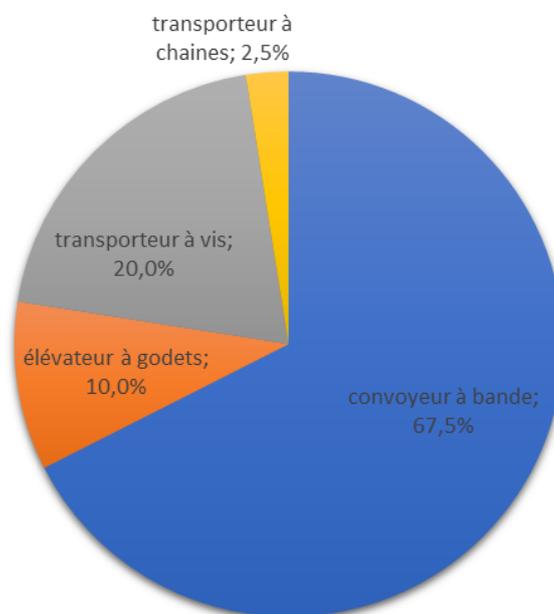


Figure 10 : Répartition des accidents en fonction du type d'équipement de transfert

Les causes identifiées pour 26 d'entre eux sont principalement :

- Pour l'explosion :
 - Le bourrage (1 accident),
 - Le retour de particules incandescentes provenant de la chaudière (1 accident),
- Pour l'explosion avec incendie :
 - La présence de particules incandescentes (braises) provenant d'autres équipements (séchoir) (1 accident),
 - Le mauvais mélange de biomasse conduisant à une fermentation (1 accident) ;
 - Les frottements mécaniques et notamment : l'échauffement ou le blocage de roulement de rouleaux, le frottement des godets sur des tôles, la présence de pièces métalliques ou de corps étrangers (3 accidents).

- Pour l'incendie :
 - Le bourrage (1 accident)
 - Les travaux par points chauds (2 accidents)
 - Le court-circuit électrique (1 accident)
 - L'étincelle électrique, notamment sur un moteur (2 accidents),
 - Des défauts matériels (par exemple, problème mécanique sur la vis sans fin acheminant les copeaux) (1 accident),
 - Les frottements mécaniques et notamment : l'échauffement ou le blocage de roulement de rouleaux, le frottement des godets sur des tôles, la présence de pièces métalliques ou de corps étrangers (12 accidents).

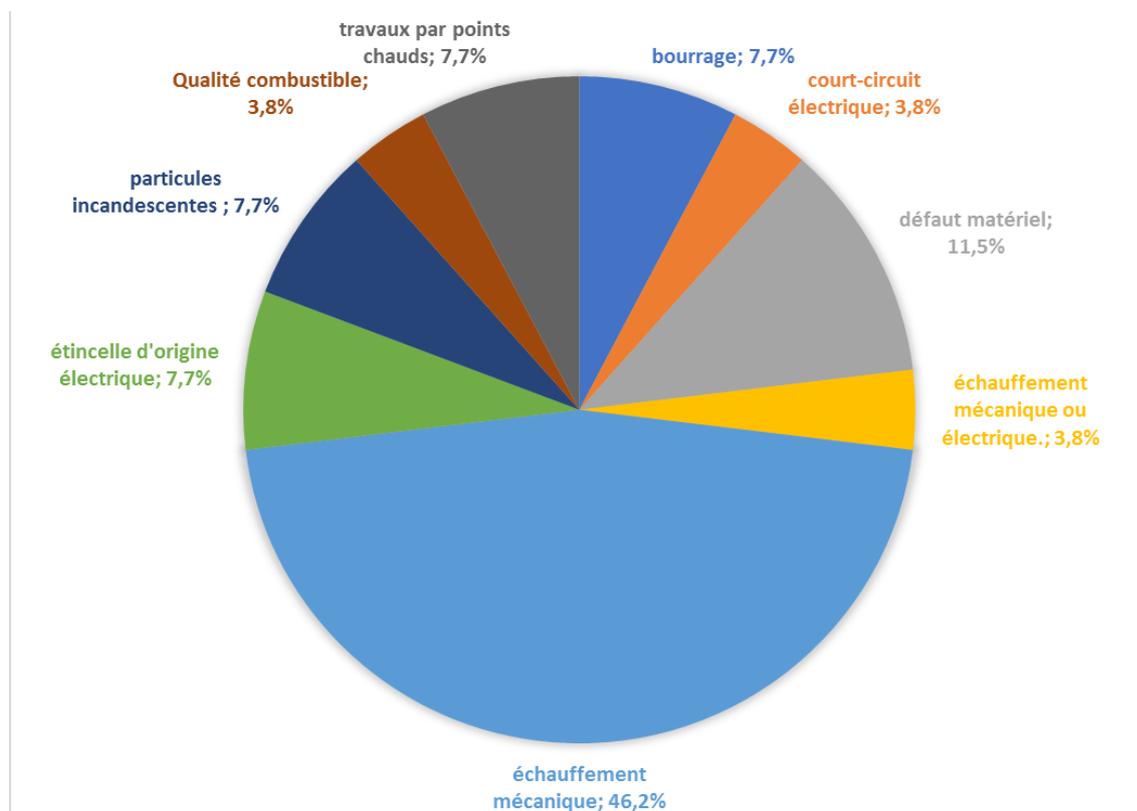


Figure 11 : Répartition des accidents sur les équipements de transfert selon leur cause

Ces causes sont à compléter par celles bien connues dans l'industrie des graines notamment :

- L'échauffement dû à la détérioration d'un roulement, d'un palier ;
- L'échauffement dû au frottement de la sangle ou d'un godet ;
- Le décrochement de godets ou blocage de godets ;
- La défaillance du moteur d'entraînement ;
- Le décrochement et la déformation (par présence de corps étranger de type tige ou bourrage) de godets ;
- La rupture de palier ou de roulement ou de chaîne ;
- Le patinage des bandes dû à une perte de tension ;
- Le blocage de roulement de rouleaux.

2.6 GESTION DES CENDRES

3 accidents concernent le stockage des cendres (46591 ; 33831 ; 38935).

L'un conduit à l'envol de cendres (sans phénomène dangereux).

Les deux autres sont des incendies, dus, pour l'un, au non-respect de la consigne d'arrosage prévue pour refroidir les cendres, pour l'autre, à la présence de cendre incandescente dans le big-bag de déchargement.

2.7 DÉPOUSSIÉRAGE

13 accidents recensés concernent des installations de dépoussiérage. 9 accidents recensés concernent des installations de dépoussiérage et se propagent aux silos. Soit un total de 22 accidents.

18 d'entre eux sont des incendies et 4 sont des explosions avec des incendies.

Les causes fournies pour 13 d'entre eux sont les suivantes :

- L'endommagement par choc (chute de tête de cheminée) sur le filtre (1 accident),
- L'aspiration de poussières ou particules incandescentes, en cas de travaux par points chauds (3 accidents),
- L'échauffement mécanique, se produisant notamment dans les équipements aspirés (installations de transfert, broyeurs, etc.) (7 accidents),
- L'auto-échauffement de poussières dans le système de filtration (1 accident),
- Un changement dans la granulométrie très fine du combustible augmentant l'empoussièragement (1 accident).

4 QUELQUES CAS D'ACCIDENTS ILLUSTRATIFS

4.1 ACCIDENTS ISSUS DE LA BASE ARIA DU BARPI

Feu couvant dans un silo à bois

N°45957 - 14/05/2014 - FRANCE - 35 – BOURGBARRE

Dans une usine de parquet, un feu se déclare au niveau de la zone d'extraction d'un silo de copeaux de bois alimentant une chaudière biomasse. Les pompiers contrôlent le silo à l'aide d'une caméra thermique mais ne détectent rien d'anormal et repartent. Une semaine plus tard (le 20/05), des fumées apparaissent au niveau de la trémie indiquant que des points chauds subsistent.

Technique d'intervention

Le silo est inerté à l'azote par le bas afin d'abaisser le taux d'oxygène. Conjointement, de la mousse est injectée par le haut pour refroidir le contenu et éviter une explosion de poussières. Enfin, une plaque est installée au niveau de la goulotte d'extraction en bas du silo pour éviter tout apport d'oxygène et mieux étouffer les points chauds. La technique d'attaque à l'eau par le haut du silo n'a pas été retenue en raison des risques d'explosion et d'effondrement de la structure. Les secours effectuent une reconnaissance en partie haute du silo puis surveillent le site durant la nuit. La capacité est ensuite vidée et les eaux d'extinction confinées. L'arrêt de production est estimé à 2 h.

Contact "métal-métal"

Un échauffement mécanique (contact acier contre alliage type bronze) au niveau de la vis d'extraction du silo serait à l'origine du feu. La pièce responsable de l'échauffement (clavette) est changée sur le silo incriminé ainsi que sur un autre silo du site.

Plan d'actions de l'exploitant à la suite de l'événement

Afin de mieux détecter les feux couvants à l'intérieur du silo, l'industriel investit dans une caméra thermique et dans des détecteurs de gaz ainsi que d'étincelles. Il crée également une voie d'accès élargie pour accéder au silo avec un engin de chantier type manitou. Enfin, une procédure encadrant la marche à suivre en cas de feu de silo est rédigée.

Feu couvant dans un silo de copeaux de bois

N°47063 - 23/08/2015 - FRANCE - 39 – SOUVANS

Vers 16 h, des fumeroles s'échappent d'un silo de 650 m³ contenant 200 m³ de copeaux de bois servant à alimenter une chaudière biomasse. Deux départs de feux au niveau de la vis d'alimentation et du chenal d'alimentation sont éteints à l'aide des RIA (robinets d'incendie armés). La sécurité incendie se déclenche.

Les secours appelés par l'exploitant arrosent la partie supérieure du silo mais il est difficile d'atteindre le point de combustion situé au cœur du silo. Le lendemain le feu couve toujours. Un protocole est mis en place avec des séquences d'extinction alternées et des périodes de relèves de température et de monoxyde de carbone. Un périmètre de sécurité de 50 m est mis en place. Les eaux d'extinction retenues par les copeaux alourdissent et fragilisent la structure du silo. Le surlendemain, le feu semble éteint. Les opérations de dépotage commencent le 3ème jour.

Afin de prévenir le risque de fermentation, les copeaux vidangés sont stockés sur une surface étanche dans l'attente de leur réutilisation dans le cadre du process de l'entreprise. Les eaux d'extinction ont été en grande partie absorbées par les copeaux de bois.

L'accident ne fait aucun blessé. En l'absence d'alimentation en copeaux de bois, la chaudière biomasse est à l'arrêt causant l'arrêt des ateliers de production. Une cinquantaine de salariés se retrouvent ainsi au chômage technique le temps des réparations. Le coût du sinistre s'élève à 415 000 EUR, en intégrant les pertes d'exploitation.

D'après l'exploitant, l'origine du sinistre est un retour de flamme survenu entre le foyer de la chaudière et le système d'alimentation. L'entreprise redémarrait ses installations après 3 semaines de congés estivaux.

A la suite de l'événement, l'exploitant entreprend un audit de son système de protection incendie. L'inspection des installations classées lui demande également de réactualiser son étude de dangers en prenant en compte l'événement survenu sur son site, ainsi que le retour d'expérience d'accidents similaires.

Feu de silo de sciure de bois**N°45896 - 29/10/2014 - FRANCE - 47 – CASTELJALOUX**

Dans une usine de panneaux de bois, un feu se déclare vers 17 h dans un silo en béton de 800 m³ (hauteur : 26 m, diamètre : 8 m) contenant 240 t de sciure de bois alimentant une chaudière biomasse. Le POI est déclenché, le système d'aspersion du silo est mis en route.

La température dans le silo est estimée à 250 °C. Les secours décident de vidanger la capacité par la vis sans fin en partie basse.

Le lendemain à 3 h, la sciure s'embrase. La chute de blocs de sciure provoque plusieurs flashes thermiques. Les pompiers décident de noyer l'intérieur de la capacité pour réduire les flammes. La vidange se poursuit. La situation s'aggrave à 6h30 avec l'embrassement du silo sur toute sa hauteur, la destruction de la vis de vidange et l'apparition de fissures au sommet du silo. Devant le risque d'effondrement de la capacité, un périmètre de sécurité de 60 m est mis en place. L'aspersion dans le silo est remise en route. Les secours refroidissent le silo par l'extérieur, plusieurs explosions ont lieu dans la cellule. Des trouées sont réalisées pour évacuer la sciure.

Le feu est éteint le 01/11 vers 10 h, 4 000 m³ d'eau ont été utilisés. La rétention du site étant insuffisante, une partie des eaux d'extinction, fortement chargées en MES, sont envoyées dans la rétention d'un site voisin.

Durant les opérations d'extinction, un pompier est grièvement brûlé après qu'un amas de sciure incandescente lui soit tombé dessus. Deux autres sont incommodés par les émanations d'un groupe électrogène. L'industriel évalue ses pertes à 600 kEUR (perte d'exploitation : arrêt du site pendant 9 jours, dégâts matériels, traitement des eaux d'extinction). Le silo doit être démolit ou faire l'objet d'un renforcement structurel.

Le sinistre semble avoir été causé par un départ de feu dans un cyclone à l'issue d'une opération de débouillage. Le scénario d'un feu de silo n'était pas abordé dans l'étude de dangers du site.

Feu de silo de copeaux de bois**N°49093 - 10/01/2017 - FRANCE - 70 - LUXEUIL-LES-BAINS**

Un incendie est détecté dans un silo de 600 m³ contenant 200 m³ de plaquettes sèches de bois.

L'alerte est donné par un employé qui a vu de la fumée se dégager. Le feu intéresse tous les équipements d'aménagement des plaquettes entre un silo de stockage et la chaudière biomasse du site. Les salariés essaient de contenir l'incendie en attendant les pompiers à l'aide d'extincteurs et de Robinets d'Incendie Armés. Les pompiers effectuent une trouée dans le silo et éteignent l'incendie. Le lendemain matin, la combustion repart dans le silo en cours de vidange par l'exploitant. Les pompiers interviennent de nouveau. La vidange se termine 72h après le début du sinistre.

L'ensemble des éléments d'aménagement du bois entre le silo et la chaudière biomasse ont été détruits. Le chauffage des ateliers et le séchage du bois ont été arrêtés pendant 2 semaines. Près de 300 m³ de bois ont été perdus.

Les causes de l'incendie ne sont pas connues mais l'exploitant prévoit de renforcer les sécurités de sa chaudière. Il prévoit notamment une supervision et une alerte à distance, un système de détection de température des vis et la revue du système d'extinction automatique qui s'est montré défaillant.

N° 5934 - 07/10/1994 - FRANCE - 38 – GRENOBLE

Une explosion survient sur une chaudière à charbon pulvérisé en lit fluidisé circulant (90 t/h à 65 bars) alors que l'alimentation est arrêtée et que l'exploitant procède au séchage du nouveau revêtement réfractaire d'un cyclone en utilisant des brûleurs à basse température alimentés au fioul BTS. Les automatismes installés ne permettant pas de diminuer l'injection d'air en allure réduite, l'excès d'air (19 % O₂ dans les fumées) entraîne une mauvaise combustion avec émission de CO et de particules imbrûlées, qui explosent tour à tour (déflagration puis explosion de poussières). L'électrofiltre de 1 000 m³ (16x3x5m, 90 kV) est détruit. Un incendie limité se déclare ; il est rapidement maîtrisé par les pompiers. Aucune victime n'est déplorée.

N° 22980 - 26/07/2002 - FRANCE - 43 – JULLIANGES

Une chaudière de chauffage central à bois explose dans une scierie après le départ de ses 6 employés pour la pause méridienne. Après l'accident, des enfants jouant dans les alentours donnent l'alerte. Les pierres constituant la cheminée de la chaufferie sont projetées à proximité, des débris sont retrouvés jusqu'à 150 m selon la presse. Des véhicules garés à proximité sont endommagés. Une ligne électrique est endommagée et les services techniques de l'électricité doivent intervenir pour rétablir le courant dans le quartier. La scierie utilisait une chaudière de type chauffage central produisant de l'eau chaude (pas de vapeur) entre 80 et 90° afin de chauffer le bâtiment de séchage du bois. Une température élevée (40 à 50°) est nécessaire pour préparer le

bois avant son passage en autoclave. La scierie recyclait les copeaux et sciures de bois qu'elle utilisait comme combustible pour la chaudière. Après l'explosion, l'ampleur des dommages empêche la reprise de l'activité sur le site. Selon l'exploitant, l'explosion serait due à une accumulation de gaz dans le foyer dû à un mauvais tirage. Le fabricant modifie l'alimentation de la chaudière de manière à la stopper en cas d'anomalie. Un problème de soupape sur la chaudière étant également suspecté (fuite et vaporisation rapide d'eau dans le foyer), une vérification des soupapes est également ajoutée aux opérations d'entretien périodiques. Les travaux de reconstruction du site devraient durer entre 6 et 8 mois.

N° 46591 - 08/05/2015 - FRANCE - 45 - BAZOCHES-LES-GALLERANDES

Un feu se déclare au niveau de la nouvelle chaufferie biomasse d'une usine de plâtre et matériel d'isolation. Le big-bag qui récupère les cendres sous l'électrofiltre de la chaufferie s'enflamme vers 21h30. La fumée sortant des grilles d'aération déclenche l'appel des secours. Le personnel de l'entreprise est sur place mais le numéro d'astreinte de la société gérant la chaufferie ne fonctionne pas. Arrivés sur les lieux, les pompiers éteignent l'incendie après coupure électrique du réseau par le service de l'électricité. Le big-bag ainsi que des câbles électriques ont brûlé, l'électrofiltre est partiellement détruit. La chaufferie biomasse est hors service pour un minimum de 2 semaines. En l'absence de production de vapeur, l'entreprise ainsi que sa voisine, réduisent leur activité de 30 % et utilisent leurs stocks. La chaufferie devrait pouvoir redémarrer avec un niveau de pollution de poussières plus élevé, en by-passant l'électrofiltre. L'analyse effectuée sur ce dernier permet de savoir s'il est réparable.

Aucune détection n'était présente sur cet équipement. Les hypothèses évoquées concernant l'origine du sinistre seraient une réaction chimique ou une cendre incandescente dans le big-bag. L'exploitant étudie plusieurs pistes d'amélioration : ajout d'une détection sur l'équipement, d'une extinction automatique, modification de l'installation, visite de formation/information des pompiers. La société qui gère la chaufferie biomasse et son sous-traitant doivent corriger le dysfonctionnement du système d'alerte.



N° 33831 - 14/04/2007 - FRANCE - 52 - CHAMOUILLEY

Des retombées de cendres se produisent à 7h45 dans le voisinage d'une usine de fabrication de panneaux de bois lors du ramonage d'une chaudière biomasse. Au moment de l'accident, le système mécanique d'évacuation des cendres sèches est dans une configuration de dépannage : sortie des cendres vers une benne intermédiaire après la vis de récupération des 2 dépoussiéreurs. Cependant, l'une des vis transférant normalement les cendres vers une benne est en réparation. La benne aurait été ainsi pleine et le niveau de cendres dans les décendeurs supérieur à la normale. Après les plaintes de certains riverains, l'exploitant nettoie et envisage de dédommager les propriétaires de véhicules qui ont été salis par les cendres. L'exploitant prévoit à court et à moyen terme la remise en place de la vis en cours de réparation, ainsi que la mise en place d'un analyseur de fumées (CO, NOx, O2) et d'un filtre sur la cheminée de la chaudière.

N° 38935 - 04/07/2010 - FRANCE - 21 - SAINT-USAGE

Dans une usine fabricant des panneaux de bois soumise à autorisation, un feu se déclare vers 12h20 au niveau d'un stockage de cendres chaudes et se propage à un stock de déchets de panneaux de fibres de bois situé à proximité.

Le stockage est isolé d'un stockage biomasse par un mur en parpaings. Néanmoins, l'importance des stockages fait qu'ils atteignent les limites du mur. De plus, il n'y a pas de mur entre le stockage de cendres et un stock de déchets de bois situé à quelques mètres. Les cendres chaudes (150 °C) issues des filtres et du cyclone d'une chaudière biomasse, sont déversées sur le sol à raison de 1 m³ toutes les 8 h. Une consigne d'arrosage concernant leur refroidissement existe.

Selon l'exploitant, cette dernière n'aurait pas été respectée au moment des faits permettant ainsi le départ de feu.

Toutefois, lors d'une inspection 0 la suite de l'événement, l'inspection des installations classées constate que :

- la hauteur des piles de bois stockées n'est pas conforme;
- une canalisation de gaz n'est pas identifiée, repérée et dégagée;
- le stockage de plaquettes de bois n'est pas réalisée dans un ilot bétonné sur 2 côtés;
- le stockage de refus de crible avant broyage ainsi que le stockage de "future biomasse" ne sont également pas organisés sous forme d'ilots;
- le système de rétention des eaux susceptibles d'être polluées n'est pas mis en place.

N° 45720 - 19/09/2014 - FRANCE - 46 - CATUS

Vers 19 h, un chauffeur venant décharger des déchets dans un centre de tri signale un dégagement de fumées, sans flamme apparente, sur un broyeur de déchets de bois. Il alerte un responsable qui, une fois sur site, décide d'appeler les pompiers. En attendant leur arrivée, le personnel ouvre le broyeur et utilise 2 extincteurs au CO2 de 2 kg sur le foyer. L'alimentation en carburant du broyeur est endommagée. Issus de la durite qui a fondu, 2 l de gazole se déversent sur le sol étanche. Les pompiers éteignent l'incendie et quittent le site à 21 h. Les eaux d'extinction sont recueillies dans la lagune de compostage du site.

Le broyeur est mis à l'arrêt pendant 4 jours pour réparations.

Nettoyé avec de l'air comprimé avant son utilisation, le broyeur broie pendant 1h30 des déchets de bois (palettes/cagettes) pour produire des plaquettes utilisables en chaudière biomasse. Il est arrêté à 16h30, en fin de poste. Le sinistre est dû à l'empoussièrément du broyeur (8 à 10 cm de poussières fines et sèches sur le compartiment moteur). Cette accumulation est due à un nettoyage incomplet en raison de la difficulté d'accès à la zone du moteur.

L'exploitant adopte une consigne demandant le contrôle systématique de l'accumulation de poussières à cet endroit en fin de poste. Il s'équipe également d'un outil améliorant l'accessibilité du soufflage et l'efficacité du nettoyage. En cas d'empoussièrément important, le nettoyage sera réalisé à l'eau. Les procédures de nettoyage des autres équipements du site sont également revues.

N° 47794 - 20/03/2016 - FRANCE - 40 - RION-DES-LANDES

A 14h45, un feu est détecté par le système de détection incendie dans un trieur de copeaux de bois d'une usine de fabrication de panneaux de bois. Le conducteur de ligne se rend sur place et constate un grand panache de fumée et des points de feu au niveau du trieur gros copeaux, du redler de transport sous le broyeur et dans le cyclofiltre du broyeur. Il déclenche l'arrêt d'urgence de l'installation et appelle les pompiers. Les équipiers incendie du site tentent d'éteindre l'incendie à l'aide de RIA et d'un camion incendie interne au site. Ils actionnent des extincteurs et des vannes déluges dans les trieurs fins et gros copeaux. L'intervention se termine à 17h30. L'atelier est arrêté durant 20 h.

Le sinistre proviendrait d'un encrassement du volet du broyeur. Le point de feu a été véhiculé jusqu'au trieur et aurait été détecté à l'aspiration du trieur en amont du cyclofiltre. Le système de détection incendie en sortie de broyeur n'a pas fonctionné du fait d'un défaut de nettoyage.

Suite à cet accident, l'exploitant nettoie et remet en état ses équipements, analyse les causes de l'encrassement du volet du broyeur. Il étudie la faisabilité de détecter le feu en fin de transport situé après le broyeur pour éviter de disperser l'incendie dans tout le triage.

N° 43924 - 17/06/2013 - FRANCE - 33 - BIGANOS

Dans une papeterie, un feu se déclare vers 23h45 au niveau d'une fosse et d'un convoyeur à godets de plaquettes de bois. L'exploitant déclenche son POI à 23h55. Les pompiers maîtrisent le sinistre et quittent le site vers 3 h. Les eaux d'extinction (720 m³) sont traitées par la station d'épuration du site. L'inspection des installations classées est informée.

L'exploitant envisage plusieurs hypothèses :

- le blocage de roulement de rouleaux ;
- le frottement des godets sur des tôles ;
- des corps étrangers dans la fosse ;
- l'existence de points chauds du type cigarettes ou autre.

Le coût du matériel détruit par le feu est évalué à 100 Keuros : installations électriques, convoyeur à godets, impact possible sur les vis d'alimentation en pied de la fosse. L'incendie a entraîné l'arrêt de l'installation à partir du 18/06 et induit des modifications au niveau de l'organisation du site :

- modification des critères de livraison des camions de plaquettes de bois ;
- augmentation des opérations de "poussage" par bulldozer.

N° 47890 - 12/04/2016 - FRANCE - 40 - VIELLE-SAINT-GIRONS

Vers 10h30, dans un centre de cogénération biomasse classé Seveso seuil haut, un feu se déclare sur un convoyeur pneumatique à copeaux de bois alimentant une chaudière à partir de 2 silos. L'alarme de détection incendie se déclenche. Le POI (commun avec le site voisin également classé Seveso seuil haut) est déclenché. Les employés attaquent le sinistre avec des extincteurs mais le renfort des secours est nécessaire en raison du risque d'envol de particules incandescentes vers la pinède. Les pompiers protègent la forêt et le voisinage.

Les flammes se propagent à un 2ème convoyeur et à l'élévateur à godets haut de 35 m. Le personnel est mis en sécurité. La chaudière et l'ensemble des installations électriques sont arrêtées. Les vannes de mise en eau (déluge) des 2 silos sont ouvertes pour éviter une propagation de l'incendie au stockage de biomasse.

Grâce à l'usage d'une grande échelle, l'incendie est éteint dans un premier temps sur l'élévateur à godets puis sur les convoyeurs. Après reconnaissance, des foyers résiduels sont trouvés dans les 2 silos contenant chacun 1 500 m³ de copeaux. Ils sont vidangés le lendemain à l'aide d'un bulldozer. Les eaux d'extinction sont confinées dans le bassin de rétention du site.

Suites

Durant la période d'indisponibilité des silos liée à la remise en état des convoyeurs, la biomasse est stockée en extérieur à proximité des dépoteurs. Ce stockage fait l'objet d'une surveillance permanente. La biomasse est transférée directement à partir du stock extérieur vers les dépoteurs à l'aide d'une chargeuse pour alimenter la chaudière sans passer par les silos.

Analyse des causes

Selon l'exploitant, le départ de feu serait d'origine mécanique ou électrique.

4.2 INCENDIES DE STOCKAGE DE BIOMASSE À L'ÉTRANGER

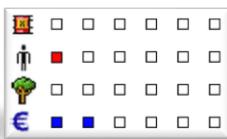
Le rapport "Health and Safety Aspects of Solid Biomass Storage, Transportation and Feeding" d'avril 2013 réalisé pour IEA Bioenergy liste des accidents illustratifs des risques d'incendie et d'explosion au niveau du stockage et du transfert de la biomasse :

- Feu de silo dans un silo de pellets de bois à Esbjerg au Danemark en 1998. L'incendie a duré 9 mois. Il est dû à un fort taux d'humidité et à une surface de contact importante entre la biomasse et les cellules ayant favorisé un auto-échauffement ;
- Feu de silo dans un stockage constitué de 5 cellules séparées de stockage de pellets de bois, à Härnosand en Suède en 2004
- Feu de silo dans un silo de pellets de bois, à Kritinehamn en Suède en septembre 2007 dû à un auto-échauffement ;
- Feu de silo dans un silo de pellets de bois, à Ramvik en Suède en 2005 dû à un auto-échauffement ;
- Feu de silo dans un silo de pellets de bois, à Lulea en Suède en septembre 2009 dû soit à un auto-échauffement suite à une fuite d'eau dans le silo, soit à une particule incandescente venue d'un site voisin et s'étant introduit par le toit ;
- Feu de silo dans un silo de pellets de bois, à Norrköping en Suède en mai 2008 dû à un auto-échauffement ;
- Feu de silo dans deux silos de pellets de bois suite à un feu de convoyeur, à Copenhague au Danemark en août 2012.

Anticiper les risques d'incendie et d'explosion dans les silos à bois

Lors des 3 dernières années, plus de 40 incendies impliquant des silos de copeaux ou de sciure de bois ont été recensés dans la base ARIA. Des difficultés opérationnelles sont couramment rencontrées par les secours (intervention longue, fragilité des structures de stockage...). Chaque intervention est ainsi unique et nécessite une bonne connaissance des risques potentiels.

1^{er} cas le 29/10/2014, Flashes thermiques et risque d'effondrement à Casteljaloux (ARIA 45896) :



Dans une usine de panneaux de bois, un feu se déclare vers 17 h dans **un silo en béton de 800 m³** (hauteur : 26 m, diamètre : 8 m) contenant 240 t de sciure de bois alimentant une chaudière biomasse. Le POI est déclenché, **le système d'aspersion du silo est mis en route.**

La température dans le silo est estimée à 250°C.

Les secours décident de vidanger la capacité par la vis sans fin en partie basse.

Le 30/10 à 3 h, la sciure s'embrase. **La chute de blocs de sciure provoque plusieurs flashes thermiques.** Les pompiers décident de **noyer l'intérieur de la capacité pour réduire les flammes.** La situation s'aggrave à 6h30 avec l'embrase du silo sur toute sa hauteur, la destruction de la vis de vidange et l'apparition de fissures au sommet du silo. Devant le **risque d'effondrement de la capacité, un périmètre de sécurité de 60 m est mis en place.**



L'aspersion dans le silo est remise en route. Les secours refroidissent le silo par l'extérieur, **plusieurs explosions ont lieu dans la cellule. Des trouées sont réalisées pour évacuer la sciure.**

Le feu est éteint le 01/11 vers 10 h, **4 000 m³ d'eau ont été utilisés.** La rétention du site étant insuffisante, une partie des eaux, fortement chargées en MES, ont été envoyées dans la rétention d'un site voisin.

Durant les opérations d'extinction, **un pompier a été grièvement brûlé par un amas de sciure incandescente,** 2 autres ont été incommodés par les émanations d'un groupe électrogène. L'industriel évalue **ses pertes à 600 k€** (perte d'exploitation : arrêt du site pendant 9 jours, dégâts matériels, traitement des eaux). Le silo devra être démolit ou faire l'objet d'un renforcement structurel.

Le sinistre semble avoir été causé par un départ de feu dans un cyclone à l'issue d'une opération de débouillage. **Le scénario d'un feu de silo n'était pas abordé dans l'étude de dangers du site.**



Quels sont les risques ?

Si les **incendies** sont les phénomènes dangereux les plus fréquents, les **explosions** sont les plus à craindre. Les effets mécaniques générés entraînent des **projections d'éclats**, des **écroulements de structure**, une **onde de souffle** et peuvent **blesser ou tuer** les agents d'intervention. **D'importants volumes d'eaux d'extinction** sont parfois mobilisés, il convient de les capter dans un bassin adapté puis de les traiter afin d'éviter de **polluer le milieu naturel.**



2^{ème} cas le 25/01/2005, Feux couvants qui perdurent à Corbenay (ARIA 29011) :

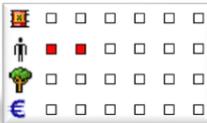


Dans une usine de fabrication de panneaux, une **explosion de poussières** de bois se produit à 6h10 dans un silo de 360 m³ contenant 30 m³ de copeaux secs (silo A). **L'accident se produit lors de la vidange du réservoir, 5 jours après qu'il ait été le siège d'un incendie** (ARIA 28990). Le silo sinistré est contigu à un second silo de copeaux secs (silo B) de même contenance. Les secours enclenchent des injections manuelles d'eau à l'intérieur et autour des silos A et B et à l'intérieur des readlers d'alimentation du silo A. Les 30 pompiers externes, appelés en renfort, mettent en place une lance canon sur le silo A à 6h24, **le refroidissement provoque une 2^{ème} explosion (vapeurs, gaz**

à l'eau, poussières en suspension ?). L'incident initie l'ouverture des événements du silo et la projection de poussières et de flammes sur le bâtiment de production contigu.

Selon le rapport d'enquête, **des feux couvants auraient subsisté** après l'incendie du 20/01 sous une pièce de 2 t en forme de cloche située en fond de silo. Le réservoir avait été pourtant bien vidé de son contenu, arrosé et nettoyé mais la pièce n'avait pas été soulevée.

3^{ème} cas le 09/06/1997, Explosion mortelle à Saillat-Sur-Vienne (ARIA 11436) :



Dans une usine de pâte à papier, la vis d'alimentation d'une chaudière brûlant des écorces est arrêtée pour maintenance. A sa remise en service, **un capteur de niveau haut encrassé nécessite l'intervention d'un opérateur sur le toit du silo d'alimentation.** Après avoir annoncé que l'installation peut redémarrer, il entreprend de redescendre lorsque **le silo explose, le tuant sur le coup.** Le toit du silo et les caillebotis sont soulevés et des tôles sont arrachées.

L'expertise effectuée permet de supposer qu'**un dépôt de poussières d'écorces accrochées aux parois du silo a subi un auto-échauffement probablement initié par une remontée d'air chaud provenant de la chaudière.** Lors du redémarrage, le dépôt s'est détaché et a créé un nuage de poussières enflammées à l'origine de l'explosion.

Quelques questions à se poser pour diminuer les différents risques



Incendie :

- Existe-t-il un système qui bloque l'entrée des corps étrangers dans le silo (grille d'arrêt) ?
- Un dispositif empêchant les flux d'air chaud notamment en cas de liaison avec une chaudière biomasse est-il installé (dispositif dit « écluse ») ?
- Une détection de points chauds asservie à un système d'extinction est-elle en place ?
- Le risque de propagation du feu entre les différentes installations a-t-il été étudié (système de découplage) ?
- Les travaux par points chauds (soudage, meulage...) font-ils l'objet d'un permis de feu ?
- Y a-t-il eu une concertation avec les services de secours pour définir la stratégie en cas de feu à l'intérieur de la capacité (vidange, noyage, inertage...) ? Est-ce qu'un bassin correctement dimensionné est prévu pour collecter les eaux d'extinction ?

Explosion :

- Est-ce que le risque d'empoussièrement est pris en compte dans l'exploitation du silo (niveau de stockage, facilité et fréquence de nettoyage des zones empoussiérées, hauteur de chute des produits en cas de transfert...) ?
- Le zonage « ATEX » a-t-il été réalisé ? Est-il correctement matérialisé ?
- Des moyens de protection ont-ils été pris (événements, dispositif de suppression ou limitant la propagation de l'explosion comme des vannes à fermeture rapide) ?

Conception et structure du silo :

- Est-ce que le silo est suffisamment éloigné des autres installations ?
- Le risque de projection d'éléments lourds et d'effet missile a-t-il été pris en compte ?
- En cas de nécessité de percer la structure pour vidanger l'enceinte, les données du constructeur du silo sont-elles conservées et facilement accessibles ?

Pour toute remarque / suggestion ou pour signaler un accident ou incident :

barpi@developpement-durable.gov.fr

Les résumés d'accidents enregistrés dans ARIA sont accessibles sur

www.aria.developpement-durable.gov.fr



Annexe D

Tableau générique d'analyse de risque

N° système	Système étudié	Sous-système	Causes	Sources d'inflammation possibles	Événements redoutés centraux+causes	Phénomènes dangereux	Intensité supposée (*)	Barrières de sécurité	Remarques	
1	Zone de déchargement	Camion benne pour combustibles solides autres que pulvérulents (déchargement)	- Présence permanente de combustible et présence normale de poussières dans le camion ET Présence d'une source d'inflammation	- Echauffement d'un équipement du camion - Départ de feu consécutif à freins chauds sur pneumatiques	Mise en suspension et inflammation d'un nuage de poussières	/	1-2	- Surveillance humaine lors du déchargement - Procédure de permis de feu - Plan de prévention avec protocole de sécurité déchargement - Arrêt d'urgence - Dispositifs de lutte anti incendie	Pas de PhD car respect de la réglementation ADR et équipements pour éviter inflammation d'un nuage de poussières dans le camion	
					Inflammation de la matière combustible	Incendie dans le camion	1-2	- Transport de courte durée - Quantité livrée peu importante - Benne couverte		
		Fosse de déchargement OU Espace bâtementaire de déchargement des matières combustibles	Présence permanente de combustible et présence normale de poussières lors de l'opération de déchargement ET Présence d'une source d'inflammation	- Courants vagabonds - Cigarette - Travaux par point chaud - Foudre - Défaillance électrique - Etincelle électrostatique - Etincelle d'origine électrique sur le camion - Présence de surfaces chaudes au niveau du camion - Défaillance mécanique ou électrique au niveau du camion et départ de feu	Inflammation de l'ATEX air/CO du ciel du silo suite au dégagement de CO dû à l'auto-échauffement	Explosion de CO	1-2	- Transport de courte durée - Quantité livrée peu importante - Dispositifs de lutte anti incendie - Benne couverte		
					Auto-inflammation du combustible	Incendie dans le camion	1-2	- Transport de courte durée - Quantité livrée peu importante - Dispositifs de lutte anti incendie - Benne couverte		
2	Dépoussiérage des équipements (broyeurs, tri, trémie, silos, transporteurs)	Système d'aspiration des poussières au bannage/filtration	Présence permanente de combustible et présence normale de poussières dans les installations ET Présence d'une source d'inflammation	- Courants vagabonds - Travaux par point chaud - Foudre - Etincelle électrostatique - Etincelle d'origine électrique / Défaillance électrique (câble, éclairage) - Etincelle d'origine mécanique en provenance des équipements aspirés (broyeur, convoyeur, etc.) et aspiration - Etincelle d'origine mécanique dû au frottement du ventilateur - Etincelle mécanique créée par le choc de corps étrangers sur les parois du système de dépoussiérage - Auto-échauffement de dépôts ou d'accumulation suite à problème d'évacuation	Inflammation du filtre par source d'ignition	Incendie du filtre	1-2	- Procédure de permis de feu - Plan de prévention - Equipotentialité des filtres - Manches antistatiques - Placer le ventilateur côté air propre - Dispositifs de lutte anti incendie	Présence de poussières lors de l'opération de déchargement qui est une opération de courte durée	
					Inflammation d'un nuage de poussières en suspension	Explosion de poussières dans le filtre/au niveau du système de dépoussiérage si source d'ignition	1-2	- Procédure de permis de feu - Plan de prévention - Dispositifs de lutte anti incendie - Equipotentialité des filtres - Manches antistatiques - Placer le ventilateur côté air propre - Cycle de décolmatage séquentiel ou décolmatage manuel d'aspiration et des filtres - Mesure de dépression qui permet de constater une défaillance au niveau du filtre à manches - Event - Contrôle régulier de la pression des filtres - Dispositifs de lutte anti-incendie et notamment sprinklage au niveau des tuyauterie		
3	Installations de préparation du combustible	Criblage/triage/tamis/table vibrante/sélecteur à air/trémie	- Présence normale de combustibles et de poussières dans les installations ET Présence d'une source d'inflammation	- Courants vagabonds - Cigarette - Travaux par point chaud - Foudre - Défaillance électrique - Etincelle électrostatique - Etincelle mécanique ou échauffement suite au frottement d'une pièce métallique dans le silo - Etincelle électrique suite à une défaillance électrique ou étincelle mécanique suite à un échauffement des engins de manutention ou des systèmes de désilage - Introduction de particules incandescentes - Bourrage de l'équipement - Echauffement mécanique au niveau de l'équipement par frottement d'un élément de l'équipement, frottement d'un corps étranger ou suite à usure/erreur opératoire (ex. mauvais serrage) - Auto-échauffement de dépôts ou d'accumulation suite à problème d'évacuation	Mise en suspension de poussières lors des opérations de préparation du combustible et inflammation d'un nuage de poussières	Explosion de poussières	1-2	- Procédure de permis de feu - Plan de prévention - Protection foudre - Interdiction de fumer - Contrôle des installations électriques - Assurer l'équipotentialité et mise à la terre - Contrôle de la qualité du combustible à réception et déferrailage - Eviter les échauffements des équipements - Détecter les bourrages - Surveiller la température - Evacuer la surpression par évent/surface soufflable - Empêcher la propagation d'une explosion depuis un espace bâtementaire ou autre équipement (découplage) - Aspirer les poussières		
					Inflammation de la matière combustible	Incendie	1-2	- Procédure de permis de feu - Plan de prévention - Protection foudre - Interdiction de fumer - Contrôle des installations électriques - Assurer l'équipotentialité et mise à la terre - Contrôle de la qualité du combustible à réception et déferrailage - Eviter les échauffements des équipements - Détecter les bourrages - Surveiller la température - Dispositifs de lutte anti-incendie		
		Déferrailage (par aimant avec retrait manuel ou retrait automatisé)	/	/	/		1-2		Pas d'ERC particulier du au déferrailage effectué par aimant sur système de transport (cf. syst de transporteur utilisé)	

N° système	Système étudié	Sous-système	Causes	Sources d'inflammation possibles	Evénements redoutés centraux+causes	Phénomènes dangereux	Intensité supposée (*)	Barrières de sécurité	Remarques
4	Système de transport du combustible d'un équipement à un autre	Elevateur à godets et fosse associée	- Présence permanente de combustible et présence normale de poussières ET Présence d'une source d'inflammation	- Courants vagabonds - Cigarette - Travaux par point chaud - Foudre - Défaillance électrique - Etincelle électrostatique - Introduction de particules incandescentes - Etincelle mécanique ou échauffement de la sangle dû à frottement de la sangle en cas de patinage sur le tambour - Etincelle mécanique ou échauffement dû à frottement suite à déformation d'un godet, décrochement d'un godet, rupture d'un palier ou d'un roulement, défaillance au niveau d'un roulement/palier, déport de sangle - Etincelle mécanique ou échauffement dû à frottement par pièce métallique au niveau du transporteur (défaut de montage ou grippage) - Etincelle mécanique créée par le choc de corps étrangers - Echauffement du moteur suite à usure des roulements/paliers ou en cas de bourrage de la fosse - Etincelle électrique suite à défaillance électrique du moteur	Mise en suspension lors du transfert du combustible et inflammation d'un nuage de poussières	Explosion de poussières	1-2	- Procédure de permis de feu - Plan de prévention - Protection foudre - Interdiction de fumer - Asservissement du fonctionnement de l'élevateur sur le système de dépeussierage - Déferrailage/Tamisage - Contrôleur de rotation avec arrêt de l'installation - Détection d'une surintensité des moteurs - Sangle antistatique et non propagatrice de flamme - Contrôleur de déport de sangle - Détecteur de température sur palier - Sangles antistatiques et non propagatrices de flamme - Equipements reliés à la terre - Protection thermique et magnétique du moteur avec alarme et arrêt de l'installation - Détecteur de bourrage - Jetées étanches ou avec aspiration - Event - Surfaces soufflables - Découplage bâtimentaire	
				Inflammation de la matière combustible	Incendie	1-2	- Procédure de permis de feu - Plan de prévention - Protection foudre - Interdiction de fumer - Déferrailage/Tamisage - Contrôleur de rotation avec arrêt de l'installation - Détection d'une surintensité des moteurs - Sangle antistatique et non propagatrice de flamme - Contrôleur de déport de sangle - Détecteur de température sur palier - Sangles antistatiques et non propagatrices de flamme - Equipements reliés à la terre - Protection thermique et magnétique du moteur avec alarme et arrêt de l'installation - Détecteur de bourrage - Sprinklage en tête d'élevateur - Dispositifs de lutte anti incendie		
		Transporteur à bandes	- Présence permanente de combustible et présence normale de poussières ET Présence d'une source d'inflammation	- Travaux par point chaud - Foudre - Etincelle électrostatique - Courants vagabonds - Cigarette - Défaillance électrique (câble, éclairage) - Etincelle mécanique ou échauffement dû à frottement des bandes suite à détente (perte de tension) des bandes et patinage des bandes ou suite à déport de bandes - Etincelle mécanique créée par le choc de corps étrangers - Etincelle mécanique ou échauffement dû à frottement par pièce métallique au niveau du transporteur (défaut de montage) - Etincelle mécanique ou échauffement dû à défaillance au niveau d'un roulement - Echauffement du moteur suite à usure des roulements ou suite à bourrage - Défaillance électrique du moteur	Mise en suspension lors du transfert du combustible et inflammation d'un nuage de poussières	Explosion de poussières	1-2	- Procédure de permis de feu - Plan de prévention - Protection foudre - Interdiction de fumer - Déferrailage - Dépeussierage des tapis - Double asservissement du tapis au système de dépeussierage - Détecteur de déport de bande avec alarme et/ou arrêt - Bande non propagatrice de chaleur - Contrôle de rotation avec alarme et/ou arrêt - Détection de bourrage au niveau du tapis avec alarme et/ou arrêt - Protection thermique et magnétique du moteur avec alarme et/ou arrêt - Transporteur capoté - Equipotentialité des équipements - Détecteur de température	
				Inflammation de la matière combustible	Incendie	1-2	- Procédure de permis de feu - Plan de prévention - Protection foudre - Interdiction de fumer - Déferrailage - Dépeussierage des tapis - Détecteur de déport de bande avec alarme et/ou arrêt - Bande non propagatrice de chaleur - Contrôle de rotation avec alarme et/ou arrêt - Détection de bourrage au niveau du tapis avec alarme et/ou arrêt - Transporteur capoté - Protection thermique et magnétique du moteur avec alarme et/ou arrêt - Equipotentialité des équipements - Détecteur de température - Dispositifs de lutte anti incendie		

N° système	Système étudié	Sous-système	Causes	Sources d'inflammation possibles	Evénements redoutés centraux+causes	Phénomènes dangereux	Intensité supposée (*)	Barrières de sécurité	Remarques
4	Système de transport du combustible d'un équipement à un autre	Transporteur à chaînes	- Présence permanente de combustible et présence normale de poussières ET Présence d'une source d'inflammation	<ul style="list-style-type: none"> - Travaux par point chaud - Foudre - Etincelle électrostatique - Courants vagabonds - Cigarette - Défaillance électrique (câble, éclairage) - Etincelle mécanique ou échauffement dû à frottement des courroies suite à détente (perte de tension) des courroies et patinage des courroies ou suite à déport de courroies et frottements - Etincelle mécanique créée par le choc de corps étrangers - Etincelle mécanique ou échauffement dû à frottement par pièce métallique au niveau du transporteur (défaut de montage) - Etincelle mécanique ou échauffement dû à défaillance au niveau d'un roulement - Echauffement du moteur suite à usure des roulements, ou suite à bourrage pouvant entraîner une déformation des barres ou une rupture des chaînes - Etincelle électrique suite à défaillance électrique du moteur 	Mise en suspension lors du transfert du combustible et inflammation d'un nuage de poussières	Explosion de poussières	1-2	<ul style="list-style-type: none"> - Procédure de permis de feu - Plan de prévention - Protection foudre - Interdiction de fumer - Déferrailage - Double asservissement du convoyeur au système de dépeussierage - Contrôle de rotation avec alarme et/ou arrêt - Détection de bourrage avec alarme et/ou arrêt - Protection thermique et magnétique du moteur avec alarme et/ou arrêt - Transporteur capoté - Contrôler la position des courroies ou leur déport éventuel - Equipotentialité des équipements - Détecteur de température 	
				Inflammation de la matière combustible	Incendie	1-2	<ul style="list-style-type: none"> - Procédure de permis de feu - Plan de prévention - Protection foudre - Interdiction de fumer - Déferrailage - Contrôle de rotation avec alarme et/ou arrêt - Détection de bourrage avec alarme et/ou arrêt - Protection thermique et magnétique du moteur avec alarme et/ou arrêt - Transporteur capoté - Contrôler la position des courroies ou leur déport éventuel - Equipotentialité des équipements - Détecteur de température - Dispositifs de lutte anti incendie 		
		Transporteur à vis	- Présence permanente de combustible et présence normale de poussières ET Présence d'une source d'inflammation	<ul style="list-style-type: none"> - Travaux par point chaud - Foudre - Etincelle électrostatique - Courants vagabonds - Cigarette - Défaillance électrique (câble, éclairage) - Etincelle mécanique ou échauffement dû à frottement par affaissement de l'axe de la vis ou suite à déformation de la vis due à un bourrage ou suite à un échauffement de roulement dû à un grippage - Etincelle mécanique créée par le choc de corps étrangers - Etincelle mécanique ou échauffement dû à frottement par pièce métallique au niveau du transporteur (défaut de montage) - Etincelle mécanique ou échauffement dû à défaillance au niveau d'un roulement - Echauffement du moteur suite à usure des roulements ou en cas de bourrage créant une surpression dans la vis - Etincelle électrique suite à défaillance électrique du moteur 	Mise en suspension lors du transfert du combustible et inflammation d'un nuage de poussières	Explosion de poussières	1-2	<ul style="list-style-type: none"> - Procédure de permis de feu - Plan de prévention - Protection foudre - Interdiction de fumer - Double asservissement du fonctionnement de la vis sur le système de dépeussierage - Event - Déferrailage - Contrôle de rotation avec arrêt de l'installation - Détection d'une surintensité des moteurs - Sangle antistatique et non propagatrice de flamme - Vis capotée - Protection thermique et magnétique du moteur avec alarme et arrêt de l'installation 	
				Inflammation de la matière combustible	Incendie	1-2	<ul style="list-style-type: none"> - Procédure de permis de feu - Plan de prévention - Protection foudre - Interdiction de fumer - Event - Déferrailage - Contrôle de rotation avec arrêt de l'installation - Détection d'une surintensité des moteurs - Sangle antistatique et non propagatrice de flamme - Vis capotée - Protection thermique et magnétique du moteur avec alarme et arrêt de l'installation - Dispositifs de lutte anti incendie 		
		Transport pneumatique	- Présence permanente de combustible et présence normale de poussières ET Présence d'une source d'inflammation	<ul style="list-style-type: none"> - Travaux par point chaud - Foudre - Etincelle électrostatique - Cigarette - Etincelle mécanique créée par le choc de corps étrangers 	Mise en suspension lors du transfert du combustible et inflammation d'un nuage de poussières	Explosion de poussières	1-2	<ul style="list-style-type: none"> - Procédure de permis de feu - Plan de prévention - Protection foudre - Interdiction de fumer - Transporteur capoté - Mise à la terre du transporteur par continuité électrique - Dispositifs de lutte anti incendie 	
				<ul style="list-style-type: none"> - Travaux par point chaud - Foudre - Etincelle électrostatique - Cigarette - Etincelle mécanique créée par le choc de corps étrangers 	Inflammation de la matière combustible	Incendie	1-2	<ul style="list-style-type: none"> - Procédure de permis de feu - Plan de prévention - Protection foudre - Interdiction de fumer - Transporteur capoté - Mise à la terre du transporteur par continuité électrique - Dispositifs de lutte anti incendie 	

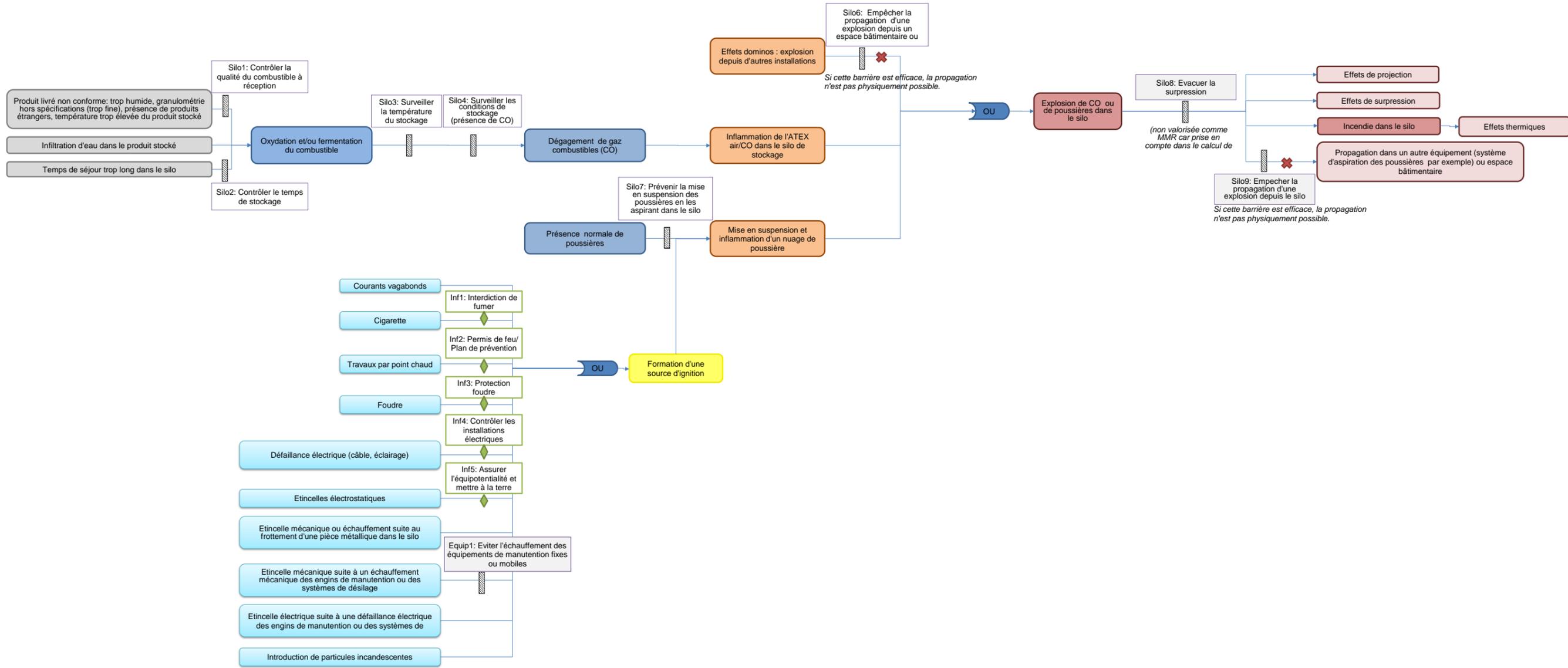
N° système	Système étudié	Sous-système	Causes	Sources d'inflammation possibles	Evénements redoutés centraux+causes	Phénomènes dangereux	Intensité supposée (*)	Barrières de sécurité	Remarques
5 (A dans le tableau 6 de ce rapport)	Silo de stockage de combustible	Silo tampon (étape de préparation du combustible) OU Silo de stockage (plat ou vertical) OU Silo ou trémie d'alimentation de la chaudière	- Présence permanente de combustible et présence normale de poussières ET Présence d'une source d'inflammation	- Courants vagabonds - Cigarette - Travaux par point chaud - Foudre - défaillance électrique - Etincelle électrostatique - Etincelle mécanique ou échauffement suite au frottement d'une pièce métallique dans le silo - Etincelle électrique suite à une défaillance électrique ou étincelle mécaniques suite à un échauffement des engins de manutention ou des systèmes de désilage - Introduction de particules incandescentes	Mise en suspension et inflammation d'un nuage de poussières	Explosion de poussières dans le silo	3 (NP)	- Procédure de permis de feu - Plan de prévention - Protection foudre - Interdiction de fumer - Contrôle des installations électriques - Assurer l'équipotentialité et mise à la terre - Contrôle de la qualité du combustible à réception et déferrailage - Surveiller la température dans le silo - Eviter les échauffements des équipements fixes ou mobiles du silo - Evacuer la surpression par évent/surface soufflable - Empêcher la propagation depuis le silo vers un espace bâtiminaire ou autre équipement (vanne écluse, clapet anti-retour, etc...) - Empêcher la propagation d'une explosion depuis un espace bâtiminaire ou autre équipement (découplage)	Un incendie non maîtrisé pourrait conduire à l'effondrement de la structure du silo, avec un risque d'ensevelissement. Néanmoins, les effets thermiques de l'incendie restent majorants. Une explosion pourrait également conduire à un ensevelissement, si les silos ne sont pas munis d'événements évitant l'effondrement de la structure.
				Inflammation de la matière combustible	Incendie dans le silo	3 (NP)	- Procédure de permis de feu - Plan de prévention - Protection foudre - Interdiction de fumer - Contrôle des installations électriques - Assurer l'équipotentialité et mise à la terre - Contrôle de la qualité du combustible à réception et déferrailage - Surveiller la température dans le silo - Ventilation naturelle du silo si silo ouvert - détecter le départ de feu (fumées, CO, température, concentration en oxygène) et réduire les effets d'un incendie (inertage, sprinklage, trappe de vidange) - Eviter les échauffements des équipements fixes ou mobiles du silo - Dispositifs de lutte anti incendie		
		Auto-échauffement activé par fermentation ou par réaction d'oxydo-réduction du combustible dans le silo en cas de : - Produit livré non conforme: trop humide, granulométrie hors spécifications (trop fine), présence de produits étrangers, température trop élevée du produit stocké - infiltration d'eau dans le produit stocké - temps de séjour trop long dans le silo	Inflammation de l'ATEX air/CO du ciel du silo suite au dégagement de CO dû à l'auto-échauffement	Explosion de CO	3 (NP)	- Contrôle de la qualité du combustible à réception et déferrailage - Contrôle du temps de stockage - Surveiller la température dans le silo - Surveiller les conditions de stockage (CO) - Ventilation naturelle du silo si silo ouvert - Règle de conception: Vérifier la dimension du stockage par rapport à la dimension critique - Evacuer la surpression par évent/surface soufflable - Empêcher la propagation depuis le silo vers un espace bâtiminaire ou autre équipement (vanne écluse, clapet anti-retour, etc...) - Empêcher la propagation d'une explosion depuis un espace bâtiminaire ou autre équipement (découplage)			
			Auto-échauffement puis auto-inflammation du combustible	Incendie dans le silo	3 (NP)	- Contrôle de la qualité du combustible à réception et déferrailage - Contrôle du temps de stockage - Surveiller la température dans le silo - Surveiller les conditions de stockage (CO) - Ventilation naturelle du silo si silo ouvert - Détecter le départ de feu (fumées, CO, température, concentration en oxygène) et réduire les effets d'un incendie (inertage, sprinklage, trappe de vidange) - Dispositifs de lutte anti incendie - Règle de conception: Vérifier la dimension du stockage par rapport à la dimension critique			
		Vieillessement de la structure	/	Effondrement du silo et épandage du produit	Ensevelissement	1-2	- Maintenance régulière et inspection des silos		

N° système	Système étudié	Sous-système	Causes	Sources d'inflammation possibles	Evénements redoutés centraux+causes	Phénomènes dangereux	Intensité supposée (*)	Barrières de sécurité	Remarques
6 (B dans le tableau 6 de ce rapport)	Espaces bâtimentaires	Espaces bâtimentaires	Présence de poussières en suspension (suite à défaut d'étanchéité des équipements, rupture ou débordement d'un convoyeur ou d'un équipement par exemple) formant un nuage de poussières ET Source d'inflammation	- Courants vagabonds - Cigarette - Travaux par point chaud - Foudre - Défaillance électrique - Etincelle électrostatique - Etincelle électrique ou échauffement mécanique d'un équipement se trouvant dans l'espace bâtementaire	Inflammation d'un nuage de poussières	Explosion de poussières	3 (NP)	- Procédure de permis de feu - Plan de prévention - Protection foudre - Interdiction de fumer - Contrôle des installations électriques - Assurer l'équipotentialité et mise à la terre - Nettoyage des équipements et des bâtiments - Aspiration des poussières au niveau des équipements - Par conception: Etanchéité/ capotage des équipements - Empêcher la propagation d'une explosion depuis un espace bâtementaire ou autre équipement (découplage)	
			Présence d'un dépôt de poussières (suite à défaut d'étanchéité des équipements, rupture ou débordement d'un convoyeur ou d'un équipement par exemple) ET propagation d'une explosion d'un premier espace bâtementaire vers l'espace étudié (silos, galerie, tour, etc.)	Explosion dans un premier espace bâtementaire (silos, galerie, tour, etc.)	Mise en suspension du dépôt de poussières et inflammation d'un nuage de poussière	Explosion de poussières	3 (NP)	- Nettoyage des équipements et des bâtiments - Aspiration des poussières au niveau des équipements - Par conception: Etanchéité/ capotage des équipements - Résistances de bâtiments - Empêcher la propagation d'une explosion depuis un espace bâtementaire ou autre équipement (découplage)	
7 (traité dans le A dans le tableau 6 de ce rapport)	Trémie d'alimentation de la chaudière	Trémie d'alimentation de la chaudière	- Présence permanente de combustible et présence normale de poussières ET Présence d'une source d'inflammation	- Travaux par point chaud - Foudre - Etincelle électrostatique - Cigarette - Remontée d'air chaud depuis la chaudière si dysfonctionnement évacuation gaz combustion - Retour de flamme depuis la chaudière	Mise en suspension et inflammation d'un nuage de poussières	Explosion de poussières	1-2	- Procédure de permis de feu - Plan de prévention - Protection foudre - Interdiction de fumer - Contrôle des installations électriques - Assurer l'équipotentialité et mise à la terre - Contrôle de la qualité du combustible à réception et déferailage - Empêcher la remontée de flammes/air chaud/étincelles depuis la	Le risque d'oxydation et de fermentation dans la trémie doit être étudié au regard du temps de stockage et le risque d'explosion secondaire de poussières
					Inflammation de la matière combustible	Incendie	1-2	- Dispositifs de lutte anti-incendie	La trémie doit être pleine quand la trappe est fermée.
8 (C dans le tableau 6 de ce rapport)	Chaudières TE/TF	Brûleur / chambre de combustion	- Perte de flamme suite à un défaut de gaz ou de comburant (air insuffisant) à l'allumage ou en appoint en fonctionnement normal si appoint utilisé - Fuite sur organe combustible en phase d'arrêt de la chaudière ET Source d'inflammation	Etincelle apportée par l'opération de réallumage de la chaudière	Accumulation de gaz naturel dans la chambre de combustion (à l'allumage ou en appoint en fonctionnement normal si appoint utilisé)	Explosion de la chambre de combustion	3 (NP)	- Asservissement de l'alimentation en gaz à l'allumage sur le rapport air / gaz dans la chambre de combustion - Asservissement de l'alimentation en gaz à l'allumage sur la présence de la flamme dans la chambre de combustion - Asservissement de l'alimentation en gaz à l'allumage ou en combustible en fonctionnement sur la température dans la chambre de combustion - Action de balayage intégrée dans la séquence de ré-allumage de la chaudière	
			- Débit nul/faible d'extraction des gaz de combustion suite à une défaillance matérielle - Mauvaise combustion du combustible et extraction insuffisante par rapport à la quantité de gaz dégagés - Accumulation de mâchefers dans le foyer et collage des cendres sur les parois empêchant la bonne évacuation des gaz de combustion ET Source d'inflammation	Flamme de la chaudière	Accumulation de gaz de combustion dans la chambre de combustion	Explosion de la chambre de combustion	3 (NP)	- Asservissement de l'alimentation en gaz à l'allumage sur le rapport air / gaz dans la chambre de combustion - Asservissement de l'alimentation en gaz à l'allumage sur la présence de la flamme dans la chambre de combustion - Asservissement de l'alimentation en gaz à l'allumage ou en combustible en fonctionnement sur la température dans la chambre de combustion - Action de balayage intégrée dans la séquence de ré-allumage de la chaudière	
			Nuage anormal de poussières suite à l'introduction en grande quantité de combustibles dû au dysfonctionnement du système d'alimentation de la chaudière ET Source d'inflammation : Flamme de la chaudière	Flamme de la chaudière	Mise en suspension et inflammation d'un nuage de poussières	Explosion de poussières	3 (NP)	- Scénario possible uniquement dans certaines conditions car sinon le combustible va brûler dans la chaudière. - Scénario couvert par l'explosion de la chambre de combustion	
		Capacité d'eau (ballon d'eau pour TE / calandre pour TF)	- Défaut de régulation de pression - Echauffement par incendie à proximité	-	Surpression dans la capacité d'eau (ballon d'eau pour TE, calandre)	BLEVE de la capacité d'eau (pressurisation lente)	3 (NP)	- Détection incendie et moyens d'extinction - Asservissement de l'alimentation en gaz à l'allumage ou en combustible en fonctionnement sur détection de pression haute dans la chaudière - Soupape de sécurité de la chaudière	
			- Défaut d'alimentation en eau - Défaillance d'un détecteur de niveau d'eau dans la calandre	-	Remise en eau sur TF surchauffés	Vaporisation brutale d'eau et éclatement de la calandre pour TF (pressurisation rapide)	3 (NP)	Asservissement de l'alimentation en eau sur détection de niveau bas dans la calandre de la chaudière	Couvert par le BLEVE de la calandre
		Surchauffeur (TE)	Débit de vapeur en entrée du surchauffeur trop important	-	Surpression dans le surchauffeur (TE)	Eclatement du surchauffeur	3 (NP)	Soupape de sécurité	Couvert par le BLEVE du ballon d'eau
9	Décendrage	Convoyeur	Présence d'imbrûlés ou de mâchefers dans les cendres	Présence de particules incandescentes	Autocombustion des imbrûlés et combustion des imbrûlés	Incendie	1-2	- Décendrage avec de l'eau - Dispositifs de lutte anti-incendie	
		Broyage par rotation de grilles des éventuels résidus et mâchefers							
		Stockage des cendres (Benne à cendres / cendrier/casier béton)	Présence d'imbrûlés ou de mâchefers dans les cendres	Présence de particules incandescentes	Autocombustion des imbrûlés et combustion des imbrûlés	Incendie	1-2	- Dispositifs de lutte anti-incendie	

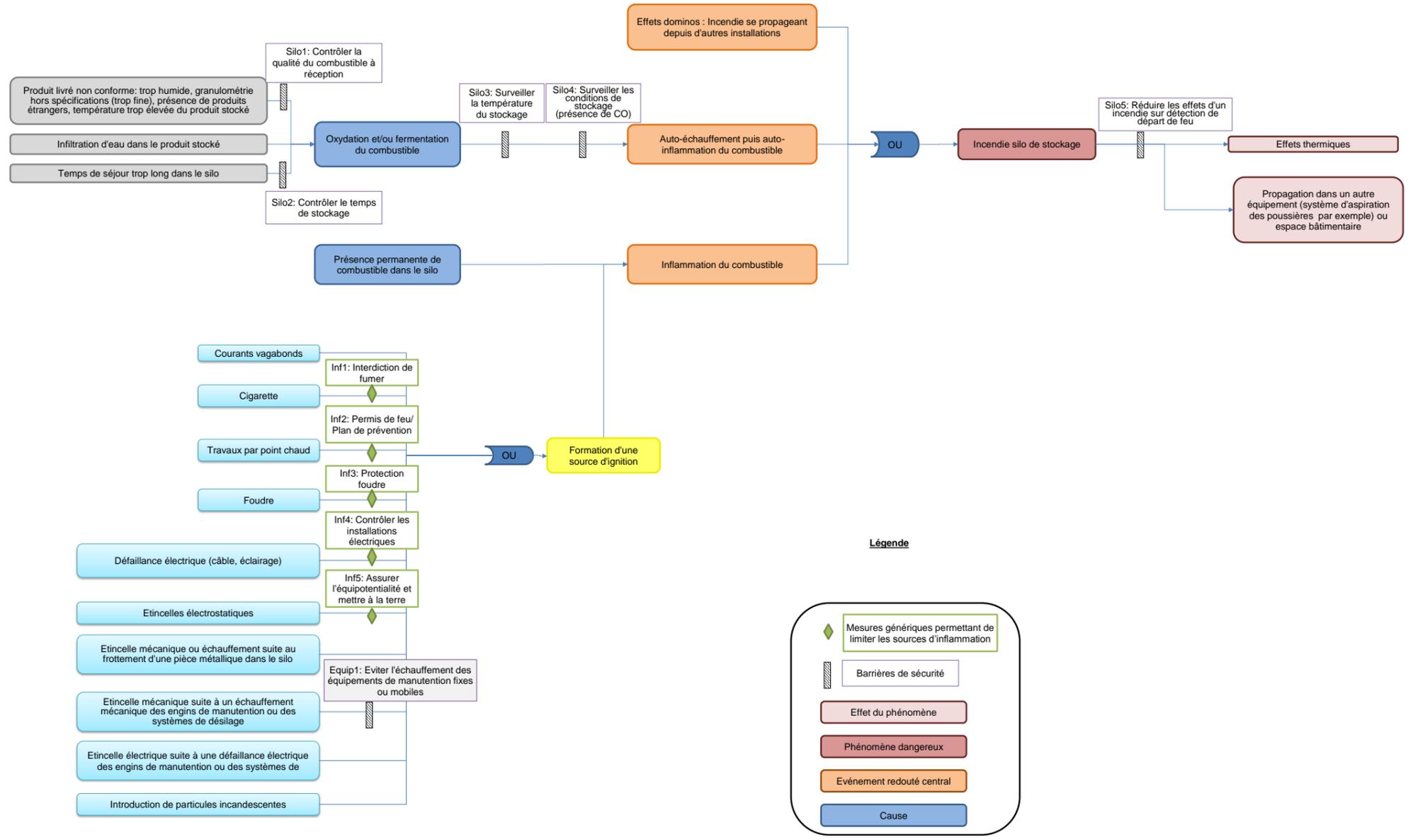
(*) Il est rappelé que l'intensité indiquée des effets des phénomènes dangereux est une intensité supposée à partir des configurations de chaudières à combustible solide les plus communément observées mais que l'intensité réelle de ces phénomènes dangereux doit être évaluée au regard de la configuration précise de l'installation étudiée. Les systèmes de désilage de fond de silo constituent des sources d'inflammation possibles mais ne sont pas le siège d'ERC ou PHD.

Silos de stockage plats

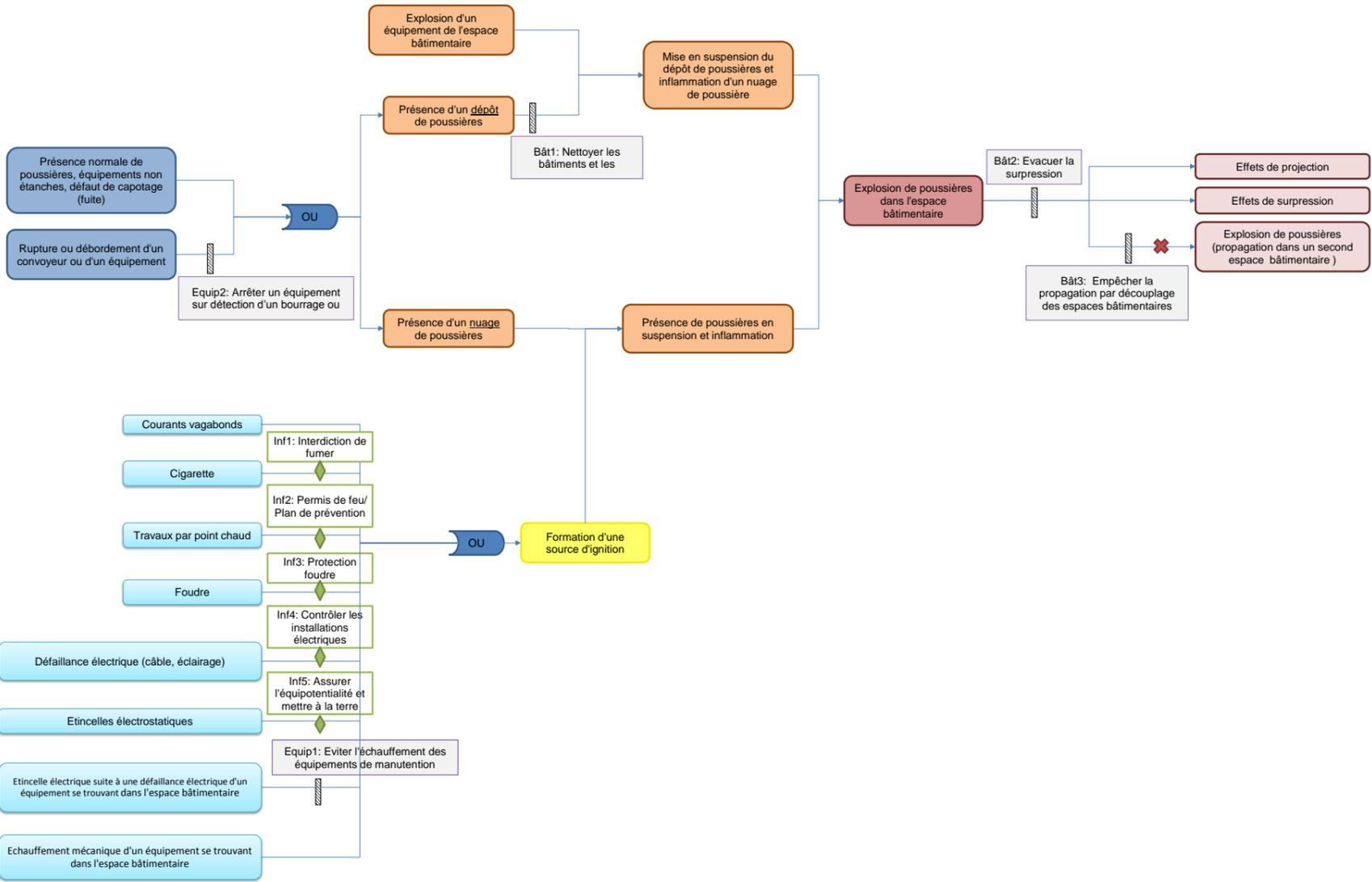
oxydation partielle? Pyrolyse?
 dégagement de COV?
 dégagement d'ester dûs à la décomposition du bois
 présence de surfaces chaudes, couche de poussières en contact avec surface chaude possible???



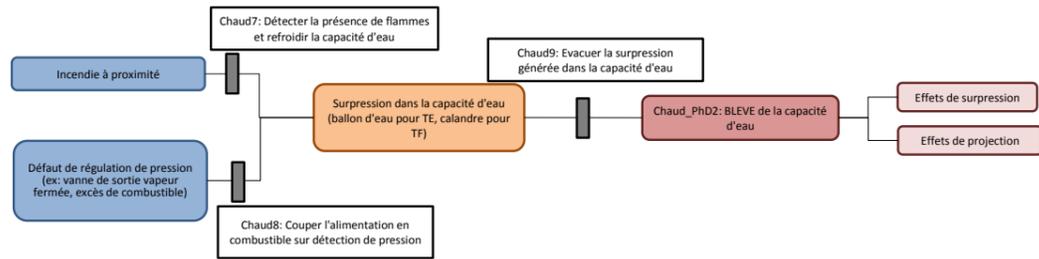
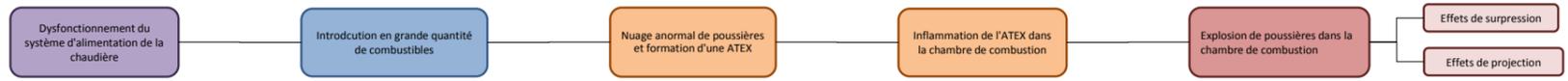
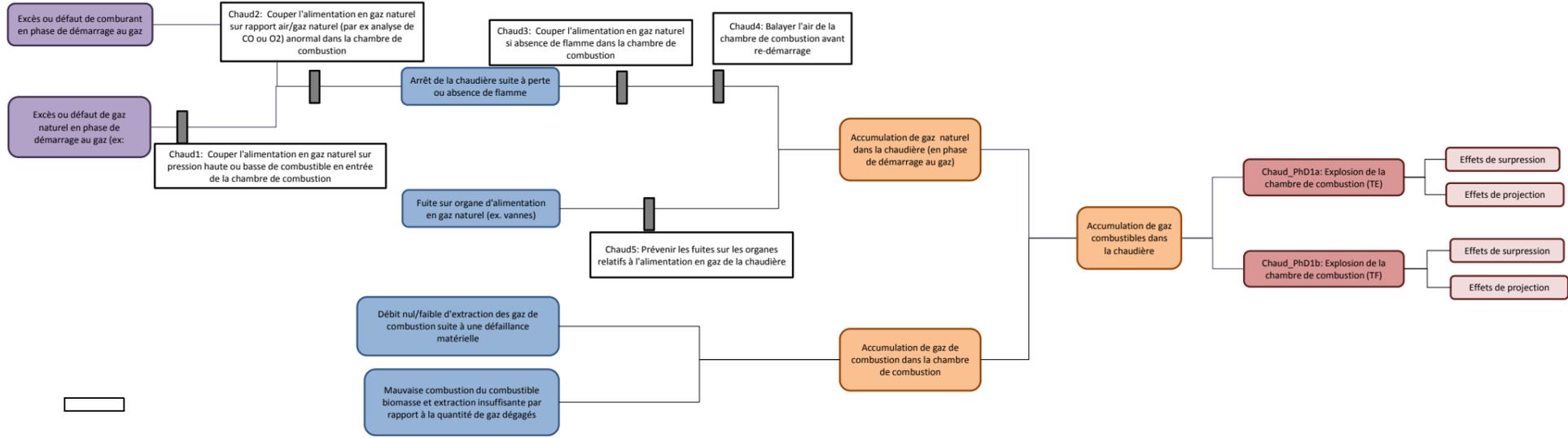
Silos de stockage verticaux

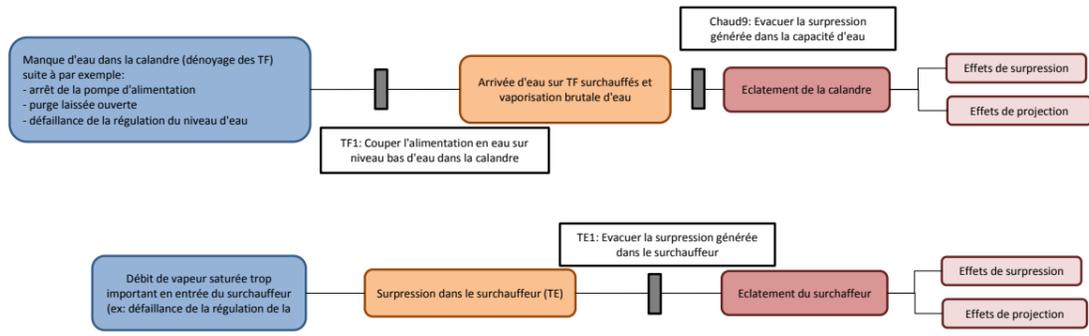


Espace bâtementaire



Inflammation d'une atmosphère explosible air/poussières





Annexe E

Extrait de la norme NF E32-020-1 : Mode d'exploitation des chaufferies : Prescriptions générales de sécurité

La norme NF E32-020 fixe les règles de sécurité en exploitation des générateurs de vapeur d'eau ou d'eau surchauffée avec ou sans présence humaine.

La norme NF E32-020-1 donne une définition de quatre modes d'exploitation des ensembles de production de vapeur d'eau ou d'eau surchauffée ainsi que les termes les plus couramment utilisés dans ce domaine, et fixe les prescriptions générales de sécurité pour chacun de ces modes. Ces définitions et prescriptions concernent la surveillance, la conduite et les équipements de ces ensembles de production.

Cette norme s'applique aux ensembles de production de vapeur d'eau de pression supérieure à 0,5 bar ou de production d'eau surchauffée de température supérieure à 110°C, fonctionnant aux combustibles solides, liquides, gazeux et/ou électricité, ainsi qu'aux générateurs par échange de fluide caloporteur, aux générateurs instantanés à circulation forcée, et aux générateurs de récupération sur flux gazeux de procédés thermiques, dont la capacité des générateurs est supérieure à 25 litres, et selon la puissance utile.

Cette annexe présente plus en détails les prescriptions générales à mettre en place pour les chaudières vapeur selon leur mode d'exploitation (exploitation de la norme NF E32-020-1 complétée par la norme NF E32-106 : Sécurité eau et pression).

NF E 32020.1 - MODE D'EXPLOITATION DES CHAUFFERIES - PRESCRIPTIONS GENERALES
NF E 32.106 - SECURITE EAU ET PRESSION (pour robinetterie, pompes... : cf texte)
CONTROLE DE CHAUFFE pour P>8000 th/h - comb. gaz (pour autres cdts : cf texte)
CAS DES GENERATEURS VAPEUR

mode	PRESENCE PERMANENTE	PRESENCE INTERMITTENTE	TELECONTROLE	AUTOCONTROLE
puissance unitaire	pas de limitation	0,3 MW à 20 MW	0,3 MW à 80 MW	0,3 MW à 80 MW
principes	surveillance : - dans local dans usine (chaufferie ou local mitoyen ou local déporté) intervention : - immédiate - arrêts d'urgence (par générateur et général ext. chaufferie) possible depuis salle de contrôle	surveillance : - dans local dans usine intervention : - en moins de 10 minutes	surveillance : - dans centre de surveillance éventuellement hors usine intervention : - en moins de 30 minutes - arrêt d'urgence à distance	surveillance : - aucune - en cas de défaut la chaufferie alerte automatiquement personnel d'astreinte intervention : - en moins de 30 minutes
vérifications	toutes les 2 heures et ap. mise en service : - vérifier visuellement bon fonctionnement des installations - vérifier que distribution d'énergie correcte, pas odeur gaz... toutes les 24 heures : - effectuer les purges des divers équipements de sécurité... tous les ans (en présence personne	à la 1ère mise en service (par personne « officielle ») : - vérifier conformité à norme toutes les 4 heures (ou 8 heures) et ap. mise en service : - vérifier bon fonctionnement des dispositifs de sécurité (provoquer le défaut ou le simuler - annulation du défaut : maxi 5 min - ou 30 s si test des 2 dispo simultanément) toutes les semaines : - vérifier fonctionnement du registre par mise en sécurité effective tous les 6 mois : - vérifier les autres dispositifs de sécurité et dispositifs signalant dérives toutes les semaines : - effectuer les purges des divers équipements de sécurité... une fois par semestre (en présence	à la 1ère mise en service (par personne « officielle ») : - vérifier conformité à norme toutes les 24 heures et ap. mise en service : - vérifier bon fonctionnement des dispositifs de sécurité (provoquer le défaut ou le simuler - annulation du défaut : maxi 5 min - ou 30 s si test des 2 dispo simultanément) toutes les semaines : - vérifier fonctionnement du registre par mise en sécurité effective tous les 6 mois : - vérifier les autres dispositifs de sécurité et dispositifs signalant dérives toutes les semaines : - effectuer les purges des divers équipements de sécurité... une fois par semestre (en présence	à la 1ère mise en service (par personne « officielle ») : - vérifier conformité à norme toutes les 24 heures et ap. mise en service : - vérifier bon fonctionnement des dispositifs de sécurité (provoquer le défaut ou le simuler - annulation du défaut : maxi 5 min - ou 30 s si test des 2 dispo simultanément) toutes les semaines : - vérifier fonctionnement du registre par mise en sécurité effective tous les 6 mois : - vérifier les autres dispositifs de sécurité et dispositifs signalant dérives toutes les semaines : - effectuer les purges des divers équipements de sécurité... une fois par semestre (en présence

mode	PRESENCE PERMANENTE	PRESENCE INTERMITTENTE	TELECONTROLE	AUTOCONTROLE
	« officielle » : - contrôle des dispositifs de sécurité en provoquant le défaut	personne « officiel le » : - contrôle des dispositifs de sécurité en provoquant le défaut - contrôle du délai d'intervention	personne « officielle » : - contrôle des dispositifs de sécurité en provoquant le défaut - fiabilité des liaisons de transmission - contrôle du délai d'intervention	personne « officielle » : - contrôle des dispositifs de sécurité en provoquant le défaut - fiabilité des liaisons de transmission - contrôle du délai d'intervention
indicateurs minimum à prévoir (NF E 32.106)	générateur vapeur : - indicateurs de niveau indép. l'un de l'autre et indép. de toute régulation; 1 au moins doit être à paroi transparente - 1 manomètre	générateur vapeur : - indicateurs de niveau indép. l'un de l'autre et indép. de toute régulation; 1 au moins doit être à paroi transparente - 1 manomètre	générateur vapeur : - indicateurs de niveau indép. l'un de l'autre et indép. de toute régulation; 1 au moins doit être à paroi transparente - 1 manomètre	générateur vapeur : - indicateurs de niveau indép. l'un de l'autre et indép. de toute régulation; 1 au moins doit être à paroi transparente - 1 manomètre
contrôle de chauffe (pour P>8000 th/h et comb. gaz nat.)	- indicateur de la temp. des gaz de combustion sortie chaudière - indicateur et enregistreur pression vapezur sur collecteur départ - indicateur de temp. de surchauffe sur collecteur départ - indicateur (ou totalisateur) du débit de combustible - analyseur automatique des fumées donnant teneur en CO2 ou O2	- indicateur de la temp. des gaz de combustion sortie chaudière - indicateur et enregistreur pression vapezur sur collecteur départ - indicateur de temp. de surchauffe sur collecteur départ - indicateur (ou totalisateur) du débit de combustible - analyseur automatique des fumées donnant teneur en CO2 ou O2	- indicateur de la temp. des gaz de combustion sortie chaudière - indicateur et enregistreur pression vapezur sur collecteur départ - indicateur de temp. de surchauffe sur collecteur départ - indicateur (ou totalisateur) du débit de combustible - analyseur automatique des fumées donnant teneur en CO2 ou O2	- indicateur de la temp. des gaz de combustion sortie chaudière - indicateur et enregistreur pression vapezur sur collecteur départ - indicateur de temp. de surchauffe sur collecteur départ - indicateur (ou totalisateur) du débit de combustible - analyseur automatique des fumées donnant teneur en CO2 ou O2
informations sur pupitre	1/ appareils de contrôle équip. chauffe : - indic. mise en service et fonctionnement registres : - position de dérivation	dégazeur : - niveau bâche alimentaire - niveau équip. chauffe : - indic. mise en service et fonctionnement - paramètres de fonctionnement - indic. spéc. au fonctionnement des dispo de régulation registres : - position de dérivation - temp. fumées en entrée	équip. chauffe : - indic. mise en service et fonctionnement registres : - position de dérivation - temp. fumées en entrée	

mode	PRESENCE PERMANENTE	PRESENCE INTERMITTENTE	TELECONTROLE	AUTOCONTROLE
	<p>générateur vapeur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - pression vapeur - niveau(x) - temp. vapeur surchauffée <p>visualisation défauts des équipements</p> <p><u>2/ appareils de commande</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - arrêt d'urgence par générateur - arrêt d'urgence général agissant sur organe de coupure extérieur à chaufferie <p><u>Nota</u> :1/ info de mesures peuvent être reprises sur signaux de sortie des régulateurs</p> <p>2/ ce sont les prescriptions pour local voisin. Si local mitoyen ou en chaufferie una alarme regroupée est suffisante.</p>	<p>générateur vapeur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - pression vapeur - niveau(x) 	<p>générateur vapeur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - pression vapeur - niveau(x) - temp. vapeur surchauffée 	
anomalies ⇒ alarme simple		<p>dégazeur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - niveau bas <p>bâche alimentaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> - niveau bas 	<p>dégazeur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - niveau bas <p>bâche alimentaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> - niveau bas <p>générateur vapeur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - niveau bas <p>soupapes de générateur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - temp. élevée à échappement (pour détection fuites) 	<p>dégazeur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - niveau bas <p>bâche alimentaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> - niveau bas <p>générateur vapeur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - niveau bas <p>soupapes de générateur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - temp. élevée à échappement (pour détection fuites)

mode	PRESENCE PERMANENTE	PRESENCE INTERMITTENTE	TELECONTROLE	AUTOCONTROLE
	registre (vérins double-effet) : - pression basse capacités	registre (vérins double-effet) : - pression basse capacités	registre (vérins double-effet) : - pression basse capacités	registre (vérins double-effet) : - pression basse capacités
anomalies ⇒ arrêt et alarme	générateur vapeur : (-pas d'excès de pression : si excès pression mise aux soupapes) - niveau très bas	générateur vapeur : - excès de pression (en SI4 seulement - en SI8 est détecté par 2 dispositifs) - excès temp. surchauffe	dégazeur : - niveau très bas (*) bâche alimentaire : - niveau très bas (*) générateur vapeur : - excès temp. surchauffe - niveau très haut (* ne fait qu'arrêter les pompes	dégazeur : - niveau très bas (*) bâche alimentaire : - niveau très bas (*) générateur vapeur : - excès temp. surchauffe - niveau très haut (* ne fait qu'arrêter les pompes
1 seul dispo de sécurité				
anomalies ⇒ arrêt et alarme 2 dispo de sécurité ou dispo autoc.		générateur vapeur : - excès de pression (en SI8 seulement - en SI4 est détecté par un seul dispo) - niveau très bas. Cette anomalie arrête en plus alim. en eau	générateur vapeur : - excès de pression - niveau très bas. Cette anomalie arrête en plus alim. en eau	générateur vapeur : - excès de pression - niveau très bas. Cette anomalie arrête en plus alim. en eau
remarques	1/ les dispositifs de sécurité doivent être indépendants et distincts des appareils de réglage et de conduite (sauf pour registres) 2/ si défaut d'énergie sur dispositif de régulation ou sécurité alors arrêt installation (avec temporisation éventuelle) 4/ en cas de fonctionnement d'un dispositif de sécurité : - en chaufferie : • alarme sonore • alarme lumineuse	1/ les dispositifs de sécurité doivent être indépendants et distincts des appareils de réglage et de conduite (sauf pour registres) 2/ si défaut d'énergie sur dispositif de sécurité alors arrêt installation 3/ le 1er défaut doit être visualisé 4/ en cas de fonctionnement d'un dispositif de sécurité : - en chaufferie : • alarme sonore générale • alarme lumineuse de chaque défaut	1/ les dispositifs de sécurité doivent être indépendants et distincts des appareils de réglage et de conduite (sauf pour registres) 2/ si défaut d'énergie sur dispositif de sécurité alors arrêt installation 3/ le 1er défaut doit être visualisé 4/ en cas de fonctionnement d'un dispositif de sécurité : - en chaufferie : • alarme sonore générale • alarme lumineuse de chaque défaut	1/ les dispositifs de sécurité doivent être indépendants et distincts des appareils de réglage et de conduite (sauf pour registres) 2/ si défaut d'énergie sur dispositif de sécurité alors arrêt installation 3/ le 1er défaut doit être visualisé

mode	PRESENCE PERMANENTE	PRESENCE INTERMITTENTE	TELECONTROLE	AUTOCONTROLE
	<p>5/ les registres sont équipés de contrôle de position de dérivation. Si la dérivation n'est pas notée alors arrêt de la TAG (avec temporisation)</p> <p>8/ un dispositif de sécurité autocontrôlé peut remplacer 2 dispositifs de sécurité, sauf pour les sondes de niveau autocontrôlées dans cdts particulières qui ne sont équivalentes qu'à un seul dispositif de sécurité</p>	<p>- déporté : <ul style="list-style-type: none"> • alarme sonore informant personnel d'intervention </p> <p>5/ les registres sont équipés de contrôle de position de dérivation. Si la dérivation n'est pas notée alors arrêt de la TAG (avec temporisation)</p> <p>8/ un dispositif de sécurité autocontrôlé peut remplacer 2 dispositifs de sécurité, sauf pour les sondes de niveau autocontrôlées dans cdts particulières qui ne sont équivalentes qu'à un seul dispositif de sécurité</p>	<p>- au centre de surveillance : <ul style="list-style-type: none"> • alarme sonore • alarme lumineuse de chaque défaut </p> <p>5/ les registres sont équipés de contrôle de position de dérivation. Si la dérivation n'est pas notée alors arrêt de la TAG (avec temporisation) 6/ les dérives et anomalies de fonctionnement sont enregistrées automatiquement</p> <p>8/ un dispositif de sécurité autocontrôlé peut remplacer 2 dispositifs de sécurité, sauf pour les sondes de niveau autocontrôlées dans cdts particulières qui ne sont équivalentes qu'à un seul dispositif de sécurité 9/ les capteurs d'anomalie peuvent assurer la fonction de capteurs de dérive</p>	<p>5/ les registres sont équipés de contrôle de position de dérivation. Si la dérivation n'est pas notée alors arrêt de la TAG (avec temporisation) 6/ les dérives et anomalies de fonctionnement sont enregistrées automatiquement 7/ - lorsque un seul dispositif est prévu il doit agir sur deux chaînes à la fois par intermédiaires de contacts élec distincts - chaque chaîne agit sur un organe distinct de coupure énergie 8/ un dispositif de sécurité autocontrôlé peut remplacer 2 dispositifs de sécurité, sauf pour les sondes de niveau autocontrôlées dans cdts particulières qui ne sont équivalentes qu'à un seul dispositif de sécurité 9/ les capteurs d'anomalie peuvent assurer la fonction de capteurs de dérive</p>
<p>nota : tout dispositif de la présence permanente doit exister dans les autres modes (passage en présence permnente lors d'intervention du personnel)</p>				

Annexe F

**Référentiels relatifs aux barrières sur les silos et sur les
chaudières Prescriptions exigées par la réglementation
pour les silos relevant du régime d'autorisation en
application de la rubrique 2160**

1 RÉFÉRENTIELS RELATIFS AUX BARRIÈRES RELATIVES AUX STOCKAGES DE BIOMASSE EN SILOS

1.1 RÉFÉRENTIELS RELATIFS AUX SILOS

Dans le cas des silos de bois relevant de la rubrique 1532 de la nomenclature des ICPE soumis à autorisation, il n'y a pas de texte applicable. Aussi il est conseillé d'appliquer pour ces silos, comme pour ceux relevant de la rubrique 2160, les dispositions de **l'arrêté du 29 mars 2004**¹. Ainsi, l'identification des barrières de sécurité pouvant intervenir en prévention ou en protection des scénarios d'accidents majeurs relatifs aux silos s'est appuyée les prescriptions techniques de cet arrêté ainsi que sur le **guide de l'état de l'art sur les silos**. Il existe également d'autres référentiels spécifiques à la biomasse tels que le rapport "**Health and Safety Aspects of Solid Biomass Storage, Transportation and Feeding**" d'avril 2013 réalisé pour **IEA Bioenergy** donnant des recommandations sur les barrières à mettre en place au niveau des stockages de biomasse.

Les prescriptions techniques de cet arrêté sont récapitulées dans le paragraphe ci-après.

Pour les explosions, des mesures de protection sont nécessaires afin de réduire les effets d'une explosion. En effet, si les effets d'une explosion primaire ne sont pas suffisamment atténués, ils peuvent conduire à la remise en suspension de poussières dans les espaces bâtimentaires où sont implantés les silos, favorisant la propagation de l'explosion. Les mesures de protection consistent notamment en la décharge de l'explosion avec des événements ou des surfaces soufflables afin de limiter la pression atteinte à une pression inférieure à la résistance mécanique des installations où l'explosion pourrait se produire et de limiter les effets de surpression à l'extérieur du site. Les surfaces soufflables peuvent être calculées selon la **norme NFPA 68 version 2007** ou en appliquant le **guide de l'état de l'art sur les silos**. Les événements sont dimensionnés en fonction des standards et normes suivants : **norme EN 14491**, **norme NF U54-540 (1986)**, **norme allemande VDI 3673 (version 2002)**, **guide NFPA 68 (édition 2018)**. Les silos plats, d'un seul volume, présentent en général un toit soufflable. Ils sont à ce titre naturellement protégés contre le phénomène de propagation d'une explosion.

1.2 PRESCRIPTIONS EXIGÉES PAR LA RÉGLEMENTATION POUR LES SILOS RELEVANT DU RÉGIME D'AUTORISATION EN APPLICATION DE LA RUBRIQUE 2160

Le tableau ci-après présente les prescriptions générales exigées par la réglementation pour les silos relevant du régime d'autorisation en application de la rubrique 2160 en application de l'arrêté du 29 mars 2004.

¹ Arrêté du 29 mars 2004 modifié relatif à la prévention des risques présentés par les silos de céréales, de grains, de produits alimentaires ou de tout autre produit organique dégageant des poussières inflammables

Arrêté du 29 mars 2004 (autorisation)	
Eloignement par rapport à l'environnement du site	<p>Articles 6 et 7</p> <p>Distance d'éloignement de 1,5 fois la hauteur des capacités de stockage et des tours de manutention et à minima 25 m pour les silos plats et de 50 m pour les silos verticaux, pour les stockages et tours de manutention vis-à-vis des habitations/ERP/routes importantes</p> <p>Distance d'éloignement de 10 m pour les silos plats et à 25 m pour les silos verticaux vis-à-vis des voies ferrées importantes et des locaux administratifs</p>
Limiter les sources d'ignition	<p>Article 4</p> <p>Procédure de permis de feu pour les travaux par points chauds</p>
	<p>Article 4</p> <p>Interdiction de fumer</p> <p>Interdiction des feux sous forme quelconque</p>
	<p>Article 9</p> <p>Conformité des installations électriques (article 422 de la norme NF C 15-100)</p>
	<p>Article 9</p> <p>Protection contre les risques liés aux effets de l'électricité statique, des courants vagabonds et de la foudre</p>
	<p>Article 15</p> <p>Les bandes de transporteur sont non propagatrices de flammes</p>
	<p>Article 18</p> <p>Conformité de l'installation de protection contre la foudre</p>
Réduction des sources d'explosion – équipements ATEX	<p>Article 9</p> <p>Certification ATEX des appareils et systèmes de protection identifiés comme pouvant être à l'origine d'explosion ou étanchéité vis-à-vis des poussières (IP 5X norme NF 60-529) et température de surface au plus égale au minimum des deux tiers de la température d'inflammation en nuage et de la température d'inflammation en couche de 5 mm diminuée de 75 °C.</p>
Réduction du risque d'explosion – Découplage	<p>Article 10</p> <p>Si présence de tiers :</p> <p>Dispositifs de découplage des espaces (ou dispositif technique de protection d'efficacité équivalente permettant d'éviter la propagation des explosion),</p>
Réduction du risque d'explosion – Réduction de la pression	<p>Article 10</p> <p>Si présence de tiers :</p> <p>Dispositifs pour limiter la pression tels que événements de décharge ou parois soufflables dans les volumes découplés (ou pour les équipements concernés : dispositifs pour assurer étanchéité et présence d'une aspiration et présence de surfaces éventables ou résistance à l'explosion ou découplage)</p>
Réduction du risque d'explosion – Système de dépoussiérage	<p>Article 15</p> <p>Présence d'événements sur les filtres à manche</p>
	<p>Article 15</p> <p>Installations de manutention asservies au système d'aspiration avec un double asservissement : au démarrage + mise en sécurité avec vidange en cas d'arrêt</p>

	Arrêté du 29 mars 2004 (autorisation)
Dispositions constructives vis-à-vis du risque incendie	Article 11 Cellules de stockage des silos béton fermées : inertage par gaz en cas d'incendie
	Article 12 Aires de chargement et de déchargement des produits situées en dehors des capacités de stockage (sauf pour les silos plats ne disposant pas de dispositifs de transport et de distribution de produits)
Surveillance et conditions de stockage	Article 14 Vérification des conditions d'ensilage des produits (durée de stockage, taux d'humidité, température, etc.)
Surveillance et conditions de stockage	Article 14 Surveillance de la température des produits stockés et enregistrement de ce suivi
Elimination des corps étrangers.	Article 12 Mise en place de grilles sur les fosses de réception
Ventilation	Article 12 Ventilation suffisante (moins de 50 g/m ³ poussières) ou aspiration via systèmes de captage de poussières, de dépoussiérage et de filtration
Nettoyage (Limiter l'accumulation de poussières)	Article 12 Nettoyage des aires de chargement des produits Article 13 Nettoyage à l'aide d'aspirateurs ou de centrales d'aspiration (utilisation de balais ou d'air comprimé doit être exceptionnelle)

Tableau 1 : Prescriptions exigées par la réglementation pour les silos

2 RÉFÉRENTIELS RELATIFS AUX BARRIÈRES RELATIVES AUX INSTALLATIONS DE COMBUSTION

Les textes réglementaires recensés pour les chaudières, quel que soit le combustible utilisé, s'appliquent aux chaudières à biomasse. Ces textes sont recensés dans le guide pour la prise en compte des chaudières industrielles dans la rédaction d'une étude de dangers référencé - DRA71 – opération A2 de décembre 2016 référencé INERIS-DRA-14-141532-12702A.

Ces textes recommandent des analyses de risques, en particulier des risques d'incendie et d'explosion, et spécifient des règles de conception, d'installation, d'entretien et de maintenance, qui évitent notamment la formation d'atmosphères explosives. Les arrêtés spécifient des prescriptions techniques relatives à la ventilation, aux installations électriques, à l'alimentation en combustible, au contrôle de la combustion, à la détection gaz et incendie et aux emplacements présentant des risques d'explosion.

Les mesures de ces normes et les bonnes pratiques recensées sur les sites avec des chaudières à biomasse consistent à :

- Mettre en place une détection de perte de flamme,
- Mettre en place une sécurité anti surchauffe (avec un contrôle de la température de l'eau et du pressostat) et limiter la puissance de la chaudière en cas de montée anormale en température,
- Détecter une élévation de température anormale avec un thermostat de sécurité et un suivi température de combustion et la contrôle de la pression de l'air comburant (avec arrêt sur seuil bas),
- Contrôler en continu la bonne combustion grâce à une caméra ou grâce à la mesure en continu de CO dans les fumées,
- Limiter la surpression avec un contrôle de pression et la présence d'une soupape de sécurité sur le ballon d'eau et en sortie de circuit de surchauffe,
- Détecter un défaut d'alimentation en eau avec une mesure de niveau d'eau bas dans le ballon de la chaudière.

Note :

La norme NF E32-020-1 donne une définition des quatre modes d'exploitation des chaudières et fixe les prescriptions générales de sécurité pour chacun de ces modes. Elles concernent la surveillance, la conduite et les équipements des chaudières. Les modes d'exploitation traités sont les suivants :

- Avec présence humaine permanente ;
- Avec présence humaine intermittente ;
- En télécontrôle ;
- En autocontrôle.

En vue de faciliter l'utilisation de ce guide, les barrières de sécurité ne sont pas différenciées selon le mode d'exploitation de la chaudière. Afin d'être aussi exhaustif que possible, ce guide traite les mesures prescrites tout mode d'exploitation confondu, depuis des barrières à mettre en place sur toutes les installations quelle que soit leur mode d'exploitation jusqu'à des barrières concernant uniquement les chaudières en autocontrôle par exemple.

L'Annexe E présente les prescriptions générales à mettre en place pour les chaudières vapeur selon leur mode d'exploitation (exploitation de la norme NF E32-020-1 complétée par la norme NF E32-106 : Sécurité eau et pression).

Annexe G

**Bonnes pratiques et prescriptions visant à réduire
l'empoussièrement des installations et les risques
d'explosion et d'incendie des équipements de transfert**

1 ETAT DE L'ART VISANT A LIMITER L'EMPOUSSIEREMENT DES INSTALLATIONS

Le guide de l'état de l'art sur les silos (pour l'application de l'arrêté ministériel relatif aux risques présentés par les silos et les installations de stockage de céréales, de grains, de produits alimentaires ou de tout autre produit organique dégageant des poussières inflammables – version 3 de 2008) indique les bonnes pratiques suivantes pour éviter l'empoussièrement des espaces bâtimentaires :

- Prendre en compte l'empoussièrement dès la conception, notamment en :
 - Évitant au maximum les surfaces horizontales dans l'espace des bâtiments abritant les installations (élément de charpente, tuyauterie, chemin de câbles, ...),
 - Éliminant sur les sols des étages des bâtiments les aspérités qui sont propices aux accumulations de poussières (favoriser les caillebotis),
 - Capotant dans la mesure du possible les installations de manutentions,
 - Aménageant des accès aux différentes parties des bâtiments,
 - Prévoyant une disposition verticale des chemins de câbles plutôt qu'à plat, pour éviter l'accumulation de poussières dans des zones difficilement accessibles.
- Nettoyer les bâtiments ;
- Découpler les zones au maximum (il convient cependant de s'interroger sur les conséquences pour les tiers) ;
- Etudier la mise en place de certaines mesures telles que des mesures de cantonnement, de goulottes ou de couloirs de chute pour accompagner la chute des produits lors de l'ensilage, l'encagement des galeries supérieures, la non utilisation du système dit « de ventilation vidange » (vidange de silo plat par ventilation), la nébulisation lors de l'ensilage, etc.

1.1 DEPOUSSIERAGE

Le dépoussiérage s'appuie sur un système d'aspiration, décrit en annexe A.

Afin de réduire les risques d'incendie et d'explosion, les systèmes d'aspiration et de dépoussiérage peuvent être munis de :

- détecteurs de points chauds,
- détection étincelle,
- manches anti-électrostatiques pour réduire le risque électrostatique,
- événements d'explosion,
- diverteur d'explosion au niveau de la gaine de transport pneumatique,
- système de brumisation des poussières par micro-spray en entrée.

1.2 NETTOYAGE

Le dépoussiérage au niveau des équipements doit être complété par un nettoyage des dépôts de poussières au niveau des espaces bâtimentaires, en :

- Nettoyant avec une fréquence adaptée toutes les parties accessibles ;
- Nettoyant avec une fréquence adaptée les parties « inaccessibles », en faisant appel à des sociétés spécialisées dans le nettoyage de surfaces d'accès difficile ;

2 DISPOSITIONS RELATIVES AUX EQUIPEMENTS DE PREPARATION ET DE TRANSFERT POUR LIMITER LES RISQUES D'INCENDIE ET D'EXPLOSION

Les dispositions de l'arrêté du 18 février 2010¹ concernant les installations de préparation de combustible biomasse s'appliquent lorsque les installations sont soumises à autorisation. Elles fournissent :

- des mesures de conception telles que :
 - Eloignement des équipements vis-à-vis des limites de site (article 6),
 - Résistance des bâtiments au feu (article 8),
 - Dispositifs de désenfumage et ventilation (article 9),
 - Conformité des installations électriques (article 11),
 - Limitation des émissions de poussières avec l'étanchéité ou l'aspiration des équipements (article 12), notamment par un capotage,
 - Evacuation de la surpression par découplage ou mise en place de surfaces soufflables (article 12),
 - Utilisation de bandes non propagatrices de la flamme pour les transporteurs à bandes et les élévateurs à godets (article 12),
- des barrières telles que :
 - Evacuation de la surpression par mise en place d'évents (article 12),
 - Nettoyage à une fréquence adaptée et définir par l'exploitant, des équipements et des espaces bâtimentaires associés (sol, parois, chemins de câbles, gaines, canalisations, appareils et équipements et toutes les surfaces susceptibles d'en accumuler) (article 15).

Le guide de l'état de l'art sur les silos (pour l'application de l'arrêté ministériel relatif aux risques présentés par les silos et les installations de stockage de céréales, de grains, de produits alimentaires ou de tout autre produit organique dégageant des poussières inflammables – version 3 de 2008) complète avec les bonnes pratiques suivantes permettant de limiter les sources d'inflammation :

¹ Arrêté du 18 février 2010 relatif à la prévention des risques accidentels présentés par certaines installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation sous la rubrique n° 2260 « broyage, concassage, criblage, déchiquetage, ensachage, pulvérisation, trituration, granulation, nettoyage, tamisage, blutage, mélange, épiluchage et décortication des substances végétales et de tous produits organiques naturels, y compris la fabrication d'aliments composés pour animaux, mais à l'exclusion des activités visées par les rubriques 2220, 2221, 2225, 2226 »

- limitation des parties plastiques ainsi que par la continuité et la mise à la terre des éléments métalliques et plus largement de l'ensemble des installations électriques pour prévenir les décharges électrostatiques ;
- respect des règles de l'art en matière d'installations électriques avec obligatoirement : la mesure de la prise de terre, la vérification de la continuité du conducteur de protection ainsi que l'interconnexion équipotentielle des masses métalliques ;
- matériels électriques a minima étanches aux poussières et organes mécaniques mobiles protégés contre la pénétration des poussières et convenablement lubrifiés et vérifiés ;
- sources d'éclairages fixes ou mobiles protégées par des enveloppes résistantes au choc et compatibles avec les zones dans lesquelles elles sont employées ;
- état des dispositifs d'entraînement, de rotation et de soutien des élévateurs et des transporteurs et état des organes mécaniques mobiles contrôlés à une fréquence adaptée déterminée par l'exploitant ;
- mise à la terre systématique et à l'équipotentialité de tous les équipements principaux ;
- association conducteur / isolant évitée autant que possible ;
- moteurs des extracteurs d'air des cellules de stockage (lorsqu'il y en a) disposant de moteurs à axes déportés, ou fixés de façon résistante (écrous freins...), pour éviter toute chute à l'intérieur des cellules ;
- nettoyage / tri par séparateur magnétique en amont du stockage de façon à éliminer les corps étrangers qui peuvent se trouver dans le produit (cailloux, pièces métalliques...) ;
- qualité antistatique des manches de filtre et des liaisons non métalliques des transports pneumatiques (plastique, plexiglas....) ;
- respect, pour les matériels électriques et non électriques en zones ATEX, de la réglementation en vigueur (Directive ATEX 2014/34/UE) et es normes ATEX associées aux modes de protection des matériels électriques (séries des normes IEC/EN 60079) et non électriques (normes ISO 80079-36/-37 et série des normes EN 13460).

Par rapport à l'empoussièrement, les aspirations des poussières doivent disposer d'un double asservissement : un premier asservissement lié au démarrage de l'installation et un deuxième qui arrête l'installation en cas de panne du système d'aspiration. Les filtres à manche doivent être protégés par des événements (sauf impossibilité technique), qui, dans la mesure du possible, débouchent sur l'extérieur.

Enfin, d'autres dispositions sont précisées dans les arrêtés ministériels de prescriptions générales applicables aux silos relevant des régimes d'enregistrement et de déclaration en application de la rubrique 2160² et peuvent être appliquées.

Ces différents éléments sont regroupés par équipements de transfert dans le tableau ci-après.

Types d'équipement	Dispositions de conception/prévention/protection
Transporteur à chaînes	<ul style="list-style-type: none"> • Capotage • Capteur de niveau pour éviter bourrage, détecteur de bourrage ou rupture dans amenée du combustible • Capteur de contrôle de la rotation moteur
Transporteur à bandes	<ul style="list-style-type: none"> • Capotage • Capteur de contrôle de la rotation moteur • Bande antistatique • Bande non propagatrice de chaleur • Détecteur de déport de bandes
Elévateurs à godets	<ul style="list-style-type: none"> • Capteur de contrôle de la rotation moteur • Détecteur de déport de sangle • Bande antistatique • Bande non propagatrice de chaleur

Tableau 1 : Prescriptions relatives aux systèmes de transport et de transfert des arrêtés ministériels de prescriptions générales applicables aux silos relevant des régimes d'enregistrement et de déclaration en application de la rubrique 2160

² Arrêté du 28/12/07 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées soumises à déclaration sous la rubrique n° 2160 " Silos et installations de stockage en vrac de céréales, grains, produits alimentaires ou tout produit organique dégageant des poussières inflammables, y compris les stockages sous tente ou structure gonflable " et Arrêté du 26/11/12 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations relevant du régime de l'enregistrement au titre de la rubrique n° 2160 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement

Annexe H

Caractérisation de l'intensité des scénarios relatifs aux chaufferies à biomasse

1. OBJECTIFS DE L'ANNEXE

L'objet de cette annexe est de présenter les résultats de modélisation obtenus en termes de distances d'effet pour les phénomènes dangereux modélisés à la suite des APR.

1.1 PHÉNOMÈNES DANGEREUX MODÉLISÉS

Ces phénomènes dangereux, listés dans le tableau ci-après, sont :

- Les explosions de poussières dans un silo de stockage de bois ;
- Les incendies dans un silo de stockage de bois ;
- Les explosions de chaudières ;
- Les BLEVE de capacité d'eau.

Afin de couvrir différentes configurations possibles de silos et de chaudières en termes de dimensions et, dans le cas des silos, de matériaux, les modélisations ont été réalisées en faisant varier ces paramètres. Les modélisations sont présentées sous forme d'abaques de distances d'effet aux seuils réglementaires.

Notes :

- Il est rappelé que certains phénomènes dangereux considérés comme pouvant conduire à des accidents majeurs et figurant dans le tableau 6 de ce guide n'ont pas été modélisés car ils nécessitent d'être traités au cas par cas (phénomènes relatifs à l'explosion d'un espace bâtementaire par exemple) ; ils ne figurent pas dans le tableau ci-après.
- Les résultats sont à considérer comme des ordres de grandeur permettant d'avoir un ordre de grandeur des distances d'effet dans le cadre de la réalisation d'une EDD, d'avoir un regard critique sur des distances d'effets obtenues pour une installation donnée dans le cadre d'une EDD ou pour positionner une installation par rapport aux limites de site.

N°	Système étudié	Sous-système	Événements redoutés centraux	Phénomènes dangereux	Paramètres clés pour la modélisation des effets
A	Silo de stockage de combustible (silo plat ou silo vertical)	Silo tampon (étape de préparation du combustible)	Mise en suspension et inflammation d'un nuage de poussières	Explosion de poussières dans un silo	Fonction du matériau (résistance mécanique des parois et détermination surfaces soufflables) et des caractéristiques géométriques (volume, dimensions, ratios entre les dimensions) du silo
		OU Silo de stockage OU Silo ou trémie d'alimentation de la chaudière	Inflammation de l'ATEX air/CO suite au dégagement de CO dû à l'auto-échauffement		
			Inflammation de la matière combustible	Incendie du silo	Fonction du matériau et des caractéristiques géométriques (volume, dimensions, ratios entre les dimensions) du silo
			Auto-inflammation du combustible		
C	Chaudières TE/TF	Brûleur / chambre de combustion	Accumulation de CO ou de gaz naturel (propane) dans la chambre de combustion (à l'allumage ou en appoint en fonctionnement normal si appoint utilisé)	Explosion de la chambre de combustion	Fonction du volume de la chambre de combustion (cf. note ci-dessous)
			Mise en suspension et inflammation d'un nuage de poussières	Explosion de poussières dans la chambre de combustion	
		Capacité d'eau (ballon d'eau pour TE / calandre pour TF)	Surpression dans la capacité d'eau (ballon d'eau pour TE, calandre pour TF)	BLEVE de la capacité d'eau (pressurisation lente)	Fonction du volume de la capacité d'eau et de la pression de rupture

Tableau 1 : Synthèse des phénomènes dangereux modélisés

Note : seul le scénario d'explosion de gaz dans la chambre de combustion est modélisé. Il est considéré que ce scénario d'explosion de gaz couvre le scénario d'explosion de poussières dans la chambre de combustion.

1.2 SEUILS RÉGLEMENTAIRES D'EFFETS

Les résultats sont exprimés en termes de distances d'effets sur les structures et sur la santé humaine liées soit à la surpression, soit aux flux thermiques engendrés par un incendie, pour un temps d'exposition supérieur à 2 minutes.

Les valeurs retenues sont celles préconisées par l'Arrêté Ministériel 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*, à savoir :

- SEI : Seuil des Effets Irréversibles d'une valeur de 3 kW/m²
- SEL : Seuil des Effets Létaux d'une valeur de 5 kW/m²
- SELS : Seuil des Effets Létaux Significatifs d'une valeur de 8 kW/m².

L'INERIS présente les résultats des modélisations en termes de distances aux seuils réglementaires thermiques ou de surpression, préconisées par l'Arrêté Ministériel 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*, à savoir :

- pour les effets de surpression sur l'homme :
 - 20 hPa ou mbar, seuils des effets irréversibles correspondant à la zone des effets indirects par bris de vitre sur l'homme ;
 - 50 hPa ou mbar, seuils des effets irréversibles correspondant à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine ;
 - 140 hPa ou mbar, seuil des premiers effets létaux correspondant à la zone des dangers graves pour la vie humaine ;
 - 200 hPa ou mbar, seuil des effets létaux significatifs correspondant à la zone des dangers très graves pour la vie humaine. »
- pour les effets thermiques sur l'homme :
 - 3 kW/m², seuils des effets irréversibles ;
 - 5 kW/m², seuil des Effets létaux ;
 - 8 kW/m², seuil des Effets Létaux Significatifs.

2. EXPLOSION DE POUSSIÈRES DANS UN SILO

2.1 OBJECTIF ET DÉMARCHE

Ce chapitre présente les abaques de distances d'effet aux seuils réglementaires en cas d'explosion primaire de poussières dans un silo. Les distances présentées sont à considérer comme des ordres de grandeur.

De nombreuses configurations géométriques et physiques de silos existent. Ils diffèrent en particulier par leur forme (plat ou vertical), leur matériau et leurs dimensions (dimensions de la base et hauteur). Afin de modéliser ce scénario et pour que chaque configuration puisse se rapprocher de cas modélisés, des configurations types ont été estimées sur la base d'hypothèses représentatives de la réalité pour chacun des paramètres précédant, à savoir type de silo, matériau, volume et ratio entre la hauteur et la base du silo. La sensibilité de chaque paramètre a par ailleurs été étudiée en observant les variations de distances d'effet provoquées par les variations des valeurs de ce paramètre.

Ce chapitre présente :

- le scénario d'explosion primaire du silo étudié et l'outil de calcul utilisé,
- les configurations types de silos étudiées,
- les abaques d'évaluation des effets aux distances réglementaires.

2.2 MODÉLISATION DE L'EXPLOSION DE POUSSIÈRES DANS LES SILOS

2.2.1 SCÉNARIO ÉTUDIÉ

Une explosion au sein d'un volume de stockage ou accueillant des appareils de manutention de biomasse peut se traduire par des effets mécaniques (onde de pression, projection de débris, déversement de produits) et thermiques sur l'environnement.

Le scénario étudié pour l'ensemble des abaques proposés au chapitre 1.2 de cette annexe est une explosion primaire de poussières en cellule entraînant la rupture de l'ensemble de la toiture. Le cas défavorable d'absence de produit et de présence de poussière dans l'intégralité du volume est considéré.

En particulier, les cas d'explosion secondaire ou les cas de rupture des parois ne sont pas considérés.

Par ailleurs compte tenu des caractéristiques des installations et de leur environnement, les effets thermiques de l'explosion ne seront pas examinés dans la suite de ce document dans la mesure où il s'agit d'effets limités à l'environnement immédiat de la cellule.

2.2.2 PRÉSENTATION DU LOGICIEL EFFEX

Pour évaluer la montée en pression d'une explosion de poussière de biomasse dans un espace fermée, il existe plusieurs méthodes. Le logiciel EFFEX, développé par l'INERIS, permettant d'estimer les niveaux de surpression dans l'environnement proche et lointain des volumes dans lesquels se déroule l'explosion considérée, est fondé sur une modélisation physique des phénomènes de propagation de flamme, de décharge de produits de combustion et de balistique. Il a fait l'objet de validations sur la base de résultats issus d'expériences à grande échelle et de constats après accident. L'hypothèse réalisée sur les poussières est que les poussières sont de classe ST1.

Pour ces calculs, on introduit donc la notion de surface soufflable, qui correspond aux surfaces les plus faibles, s'ouvrant le plus rapidement lors de la montée en pression. Les caractéristiques de ces surfaces ajoutées aux caractéristiques géométriques des volumes vont influencer la surpression maximale pouvant être atteinte dans le silo.

Cette surpression maximale, associée au volume du silo permet de déterminer les effets dans l'environnement.

2.3 CONFIGURATIONS DE SILOS ÉTUDIÉS

Différentes configurations de cellules ont été étudiées. La typologie des cellules de stockage et des surfaces soufflables considérées est présentée ci-dessous.

2.3.1 DESCRIPTION DES TYPOLOGIES DES CELLULES DE STOCKAGE CONSIDÉRÉES ET HYPOTHÈSES ASSOCIÉES

2.3.1.1 CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES

Les cellules ont des volumes très variables en dimensions et en forme, influençant la durée et l'intensité d'une explosion en leur sein. Sur la base du retour d'expérience et de la connaissance du secteur des silos, plusieurs volumes ont été étudiés entre 100 et 5000 m³.

Les catégories de silos sont divisées en deux grandes familles, les silos verticaux et les silos plats (type hangar). Les silos verticaux considérés ici ont des ratios d'allongement compris entre 0.25 et 2. Pour les silos plats, on considère des ratios supérieurs à 2 (les ratios inférieurs correspondent aux silos verticaux) et on ne retient que la valeur de 2 dans les calculs (les résultats étant identiques pour tous les ratios supérieurs à 2). Le ratio d'allongement d'un volume est défini par le ratio entre le diamètre d'une section circulaire équivalente à la section du volume et la hauteur. L'équivalence utilisée entre une section carrée et circulaire de cellule est illustrée ci-dessous.

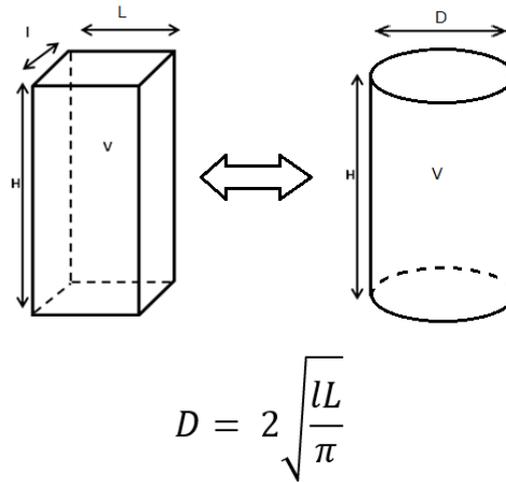


Figure 1 : illustration d'équivalence de volume pour le calcul du ratio

Le ratio est donc calculé de la façon suivante :

$$\frac{D}{h} = \frac{2}{h} \sqrt{\frac{Ll}{\pi}}$$

Pour chaque catégorie de silos, on distingue 2 types de matériaux constitutifs des parois, en béton armé ou acier. Pour les silos verticaux, la distinction sera faite entre les silos en béton armé ou acier. Pour les silos plats, il n'y a pas de distinction entre les deux matériaux, car dans les deux cas, le toit est intégralement soufflable de résistance bien inférieure à celles des parois qu'elles soient en béton ou métalliques et ce paramètre n'influe donc pas sur les modélisations.

Enfin pour chaque catégorie de matériau, deux classes de résistance des parois sont proposées. Ces hypothèses de résistance des parois des cellules permettent de considérer uniquement la rupture de la toiture dans les scénarios d'explosion.

Les hypothèses de modélisations pour chaque type de silo sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Type de silo	Vertical		Plat
Volumes en m3	[100 - 5000]		[100 - 5000]
Hauteur de silo (d'après les définitions de l'arrêté du 29 mars 2004)	Plus de 10 m		Moins de 10 m
Ratio (D/h)	Intervalles de ratio définis par les bornes suivantes : [0.25, 0.5 , 1, 2]		[>2]
Nature des parois du silo	Métallique	Béton	Tous types de parois confondus : Béton ou métallique
Résistance minimale des parois de cellule à l'explosion	[200, 400] mbar	[400, 800] mbar	[150, 200] mbar

Tableau 2 : hypothèses géométriques et de résistance des cellules associées aux scénarios d'explosions primaires considérés

Note : Les volumes modélisés sont les mêmes pour les silos plats et pour les silos verticaux. Toutefois, il est souligné que seuls les silos plats de hauteur inférieure à 10 m, avec des volumes compris entre 3140 et 5000 m³ et des ratios D/h compris entre 2 et 2,5 répondent à la définition de silo plat donnée dans l'arrêté du 29 mars 2004 relatif à la prévention des risques présentés par les silos¹.

Pour faciliter la lecture, les abaques relatifs aux explosions des silos verticaux sont présentés avec des intervalles de ratio (ratios compris entre 0,25 et 0,5, ratios compris entre 0,5 et 1, ratios compris entre 1 et 2).

2.3.1.2 CARACTÉRISTIQUES DES SURFACES SOUFLABLES

Le calcul des surpressions d'explosion dans les volumes considérés est dépendant de la présence de parois faibles ou surfaces soufflables sur les volumes considérés.

Afin de simplifier l'approche, on considère cinq catégories de surfaces soufflables ou faibles telles qu'exposées dans le tableau suivant :

	Catégorie 1	Catégorie 2	Catégorie 3	Catégorie 4	Catégorie 5
Exemples type de surface soufflable	Polyester fixé par crochet, surface ouverte, fibrociment, translucides	Tôles métalliques affaiblies ou bardage métallique	Toiture silo métallique	Toiture béton affaiblie	Toiture béton
Pression de rupture à l'explosion maximale	60 mbar	100 mbar	200 mbar	200 mbar	400 mbar
Masse surfacique	< 5 kg/m ²	< 10 kg/m ²	< 15 kg/m ²	< 250 kg/m ²	< 250 kg/m ²
Typologie de silo associée	Plat métallique	Plat métallique Vertical métallique	Vertical métallique	Vertical béton	Vertical béton

Tableau 3 : Catégories de surfaces soufflables considérées

La dimension de surface soufflable est également un paramètre influençant la pression maximale atteinte dans l'enceinte et les distances d'effet dans l'environnement. Etant données le scénario étudié, les configurations choisies et le choix des catégories de surface soufflable, la dimension de surface utilisée pour les abaques réalisés correspond à la surface intégrale de la toiture soit :

$$S = \frac{\pi D^2}{4} \text{ ou } S = LL$$

¹ D'après la définition de l'arrêté du 29 mars 2004 relatif à la prévention des risques présentés par les silos, un silo plat est un silo dont les capacités de stockage ont une hauteur des parois latérales retenant les produits inférieure ou égale à 10 mètres au-dessus du sol.

2.3.2 VALIDATION DES PARAMÈTRES SÉLECTIONNÉS

Afin de réaliser des abaques, l'INERIS a réalisé des études paramétriques sur différentes variables du calcul.

De cette analyse, les variables suivantes ont été retenues comme influentes sur les distances d'effet dans l'environnement :

- Volume de l'enceinte ;
- Ratio diamètre / hauteur de l'enceinte ;
- Pression de rupture des surfaces soufflables ;
- Masse surfacique des surfaces soufflables.

A titre illustratif, la variation des distances d'effet au seuil réglementaire en fonction de ces paramètres est donnée par la suite au travers de quelques exemples.

1. Influence du ratio diamètre / hauteur de l'enceinte et volume de l'enceinte

Le graphe ci-dessous montre la variation des distances d'effet des SELS en fonction du ratio D/h et du volume d'enceinte.

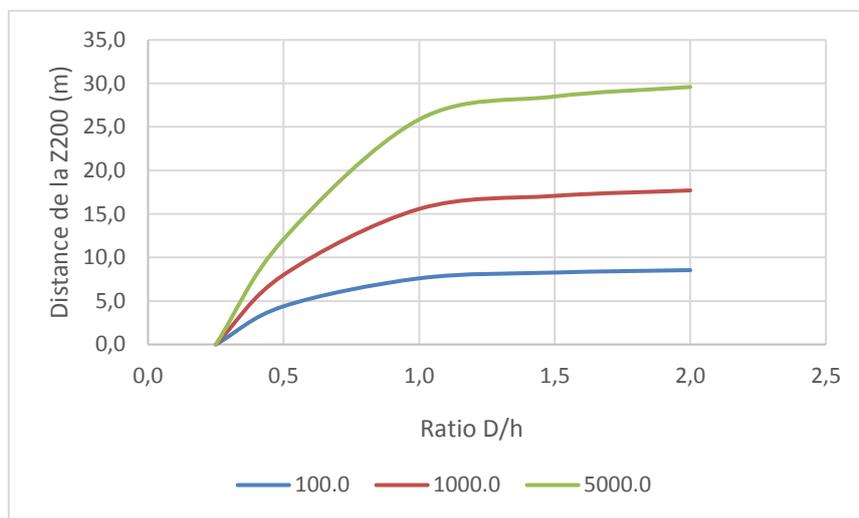


Figure 2 : Distances de la zone 200 mbar (SELS) en fonction du ratio d'allongement pour différents volumes 100, 1000 et 5000 m³

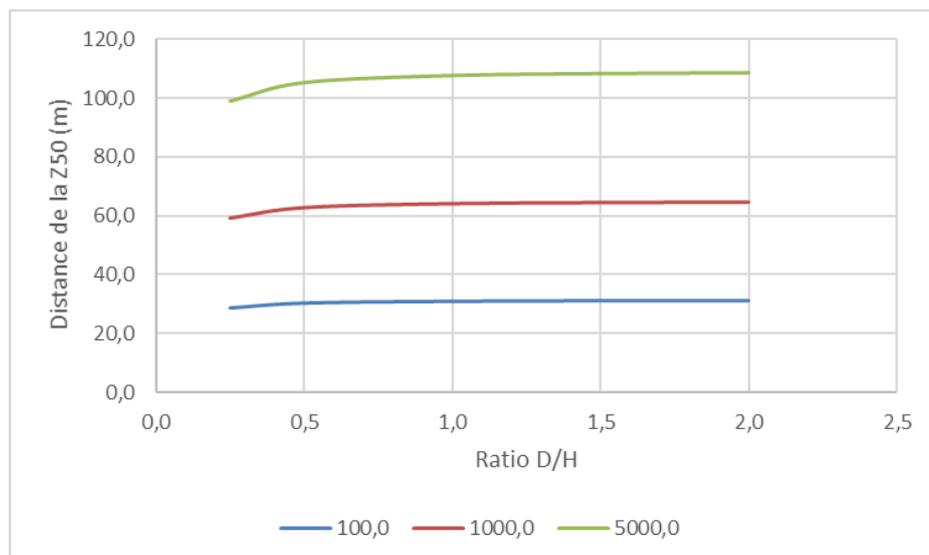


Figure 3 : Distances de la zone 50 mbar (SEI) en fonction du ratio d'allongement pour différents volumes 100, 1000 et 5000 m³

Le ratio D/h est un paramètre influent pour les distances d'effet car il agit sur la pression maximale atteinte dans le volume d'une part et sur les distances d'effet au sol de par la variation de la hauteur d'origine des effets de pression d'autre part. Pour un volume donné, on observe que la variation des distances d'effet en fonction du ratio D/h s'atténue fortement pour les basses surpressions et est donc plus importante pour les zones 200 mbar et 140 mbar que 50 mbar et 20 mbar (les grandes distances d'effet aux basses surpressions sont plus grandes).

Ce graphique permet également d'observer que quel que soit le volume, les variations de distance d'effet sont faibles entre un ratio de 1 et 2. Ainsi cet intervalle ne sera pas redécoupé dans le choix des paramètres. A contrario, quel que soit le ratio D/h, les variations des distances d'effet en fonction du volume sont importantes, ce paramètre sera donc le paramètre principal des abaques.

2. Influence de la pression de rupture des surfaces soufflables

Le graphe ci-dessous montre la variation des distances d'effet en fonction de la pression de rupture des surfaces soufflables, pour un silo avec un volume donné et un ratio donné. Les distances d'effet SELS et SEL passent de 0 à 10 m en augmentant la pression de rupture des surfaces soufflables ; les distances d'effet SEI passent de 18 m à 49 m.

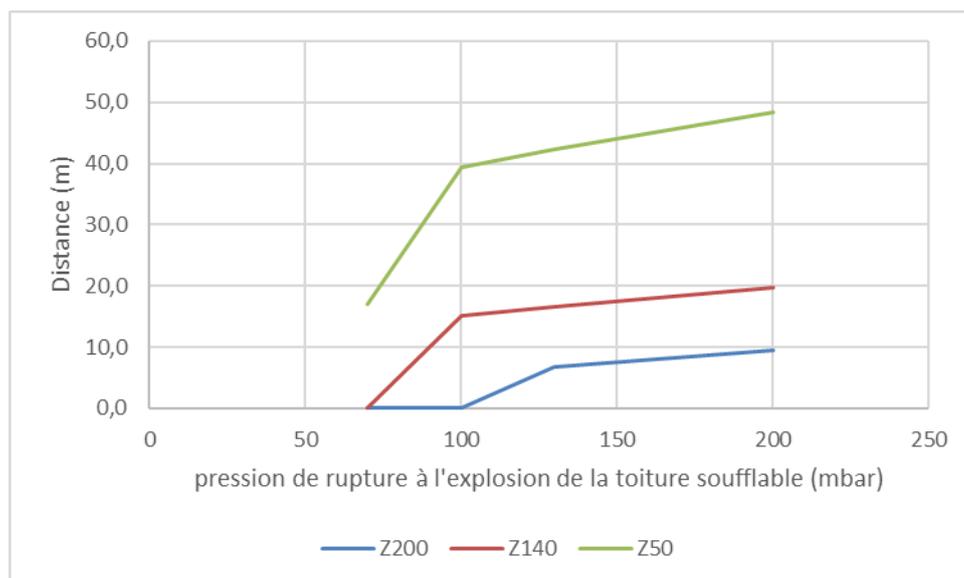


Figure 4 : Distances d'effet en fonction de la pression de rupture des surfaces soufflables en toiture

La pression de rupture influence fortement la pression maximale atteinte dans le volume et donc les distances d'effet. Cela est valable quel que soit le niveau de surpression observé.

3. Influence de la masse surfacique des surfaces soufflables

Le graphe ci-dessous montre la variation des distances d'effet en fonction de la masse surfacique des surfaces soufflables, pour un silo avec un volume donné, un ratio donné et une pression de rupture de 100 mbar. Il montre que les distances d'effet pour des silos en béton (faible masse surfacique) sont supérieures à celles des silos en métal (forte masse surfacique). Les distances d'effet aux seuils des effets létaux (SEL) augmentent de 0 à 20 m pour des masses surfaciques passant de 200 à 250 kg/m².

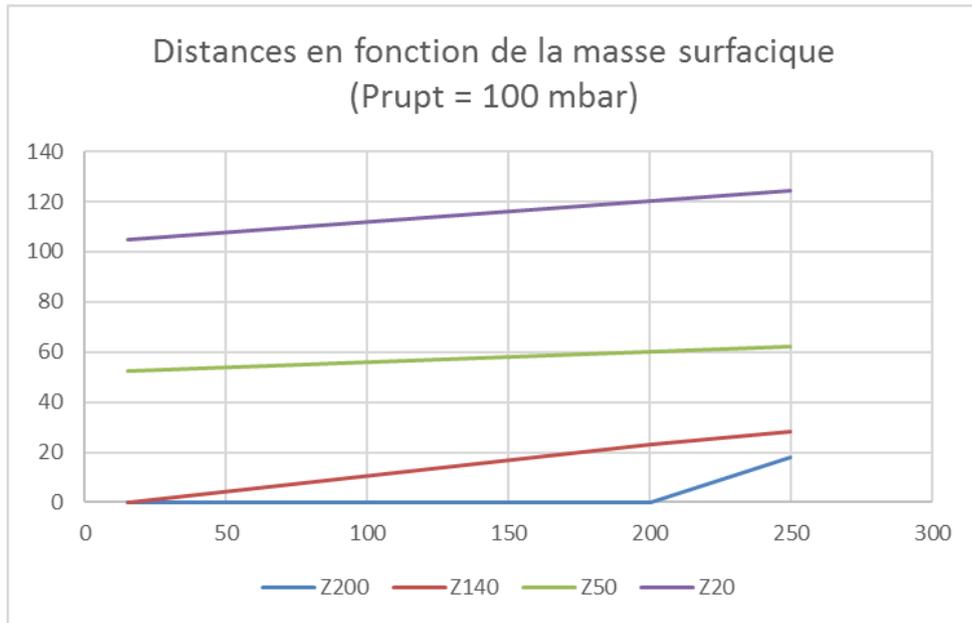


Figure 5 : : Distances d'effet en fonction de la masse surfacique

La masse surfacique influence la cinétique d'ouverture de la surface soufflable et donc la pression maximale atteinte dans le volume et les distances d'effet résultantes. Cela est valable quel que soit le niveau de surpression observé.

2.4 RÉSULTATS : ABAQUES DE DISTANCES D'EFFET AUX SEUILS RÉGLEMENTAIRES

Les abaques de distances aux seuils réglementaires sont présentés aux paragraphes ci-après avec les hypothèses suivantes :

Type de silo	Matériau constitutif des parois	Volume (m ³)	Ratio D/h	Pression de résistance des parois (mbar)	Masse surfacique de la surface soufflable (kg/m ²)	Pression maximale de rupture de la surface soufflable (mbar)	Page
Vertical	Béton	[100-5000]	[0.25 à 2]	400	< 250	200 mbar	12
		[100-5000]	[0.25 à 2]	800	< 250	400 mbar	14
	Métallique	[100-5000]	[0.25 à 2]	200	< 10	100 mbar	16
		[100-5000]	[0.25 à 2]	400	< 15	200 mbar	18
Plat	Métallique	[100-5000]	[>2]	120	< 5	60 mbar	20
		[100-5000]	[>2]	200	< 10	100 mbar	21

2.4.1 SILOS VERTICAUX EN BÉTON

2.4.1.1 SILOS VERTICAUX EN BÉTON AVEC UNE PRESSION DE RUPTURE DE LA SURFACE SOUFFLABLE À L'EXPLOSION DE 200 MBAR

Hypothèses :

	Hypothèses
Pression de rupture de la surface soufflable (mbar)	200
Masse surfacique de la surface soufflable (kg/m ²)	<250
Résistance minimale des parois (mbar)	400

Abaques :

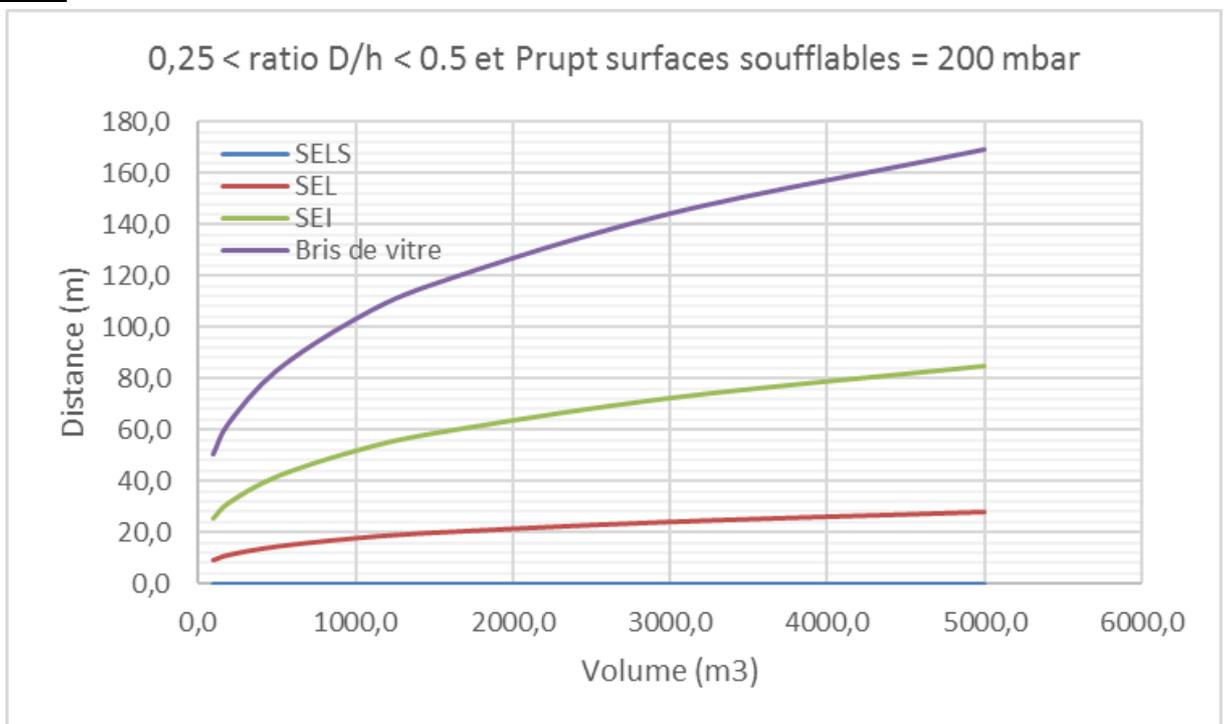


Figure 6: Explosion de poussières dans un silo vertical béton - Distances aux seuils d'effets de surpression (SEI en vert, SEL en rouge et SELS en bleu) en fonction du volume pour un ratio D/h compris entre 0,25 et 0,5 et pour une pression de rupture de la surface soufflable (toit) de 200 mbar

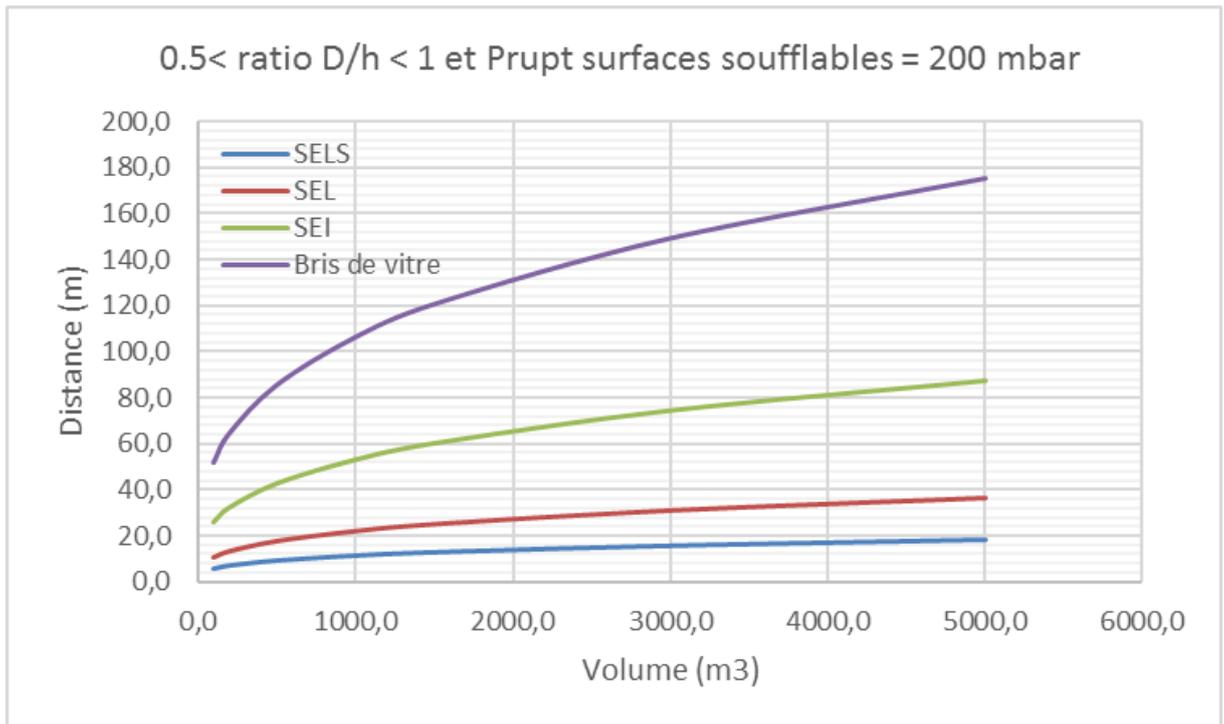


Figure 7: Explosion de poussières dans un silo vertical béton - Distances aux seuils d'effets de surpression (SEI en vert, SEL en rouge et SELS en bleu) en fonction du volume pour un ratio D/h compris entre 0,5 et 1 et pour une pression de rupture de la surface soufflable (toit) de 200 mbar

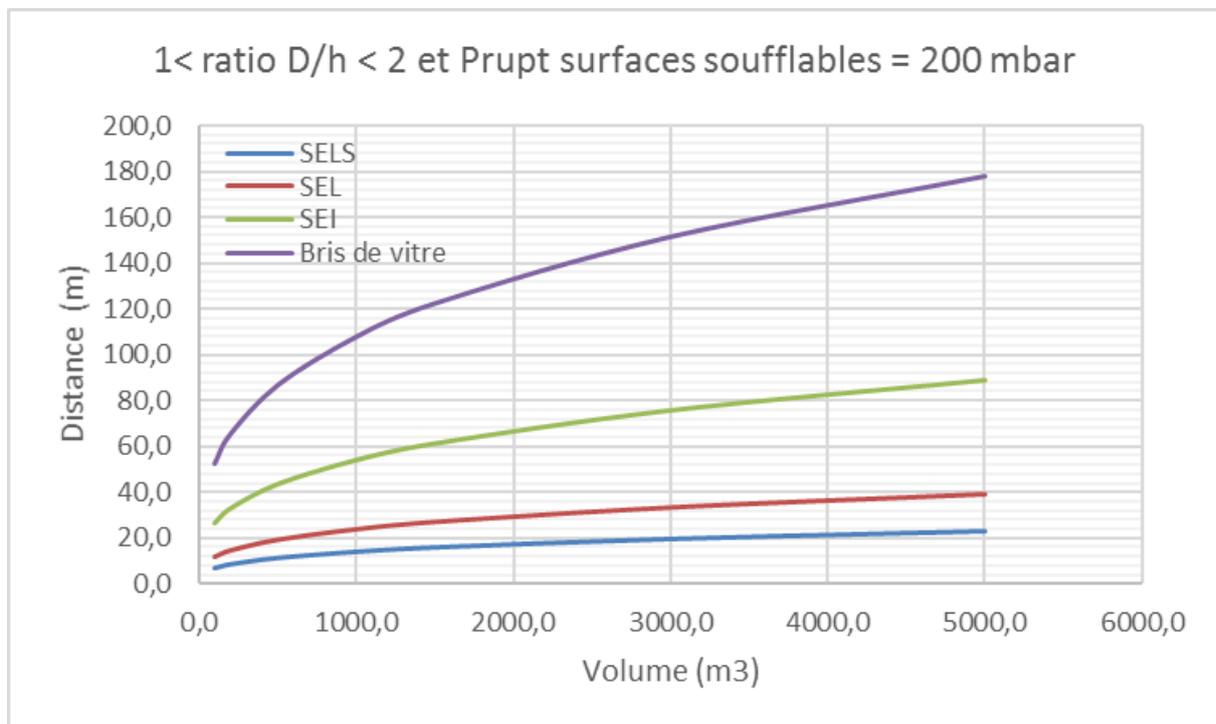


Figure 8: Explosion de poussières dans un silo vertical béton - Distances aux seuils d'effets de surpression (SEI en vert, SEL en rouge et SELS en bleu) en fonction du volume pour un ratio D/h compris entre 1 et 2 et pour une pression de rupture de la surface soufflable (toit) de 200 mbar

2.4.1.2 SILOS VERTICAUX EN BÉTON AVEC UNE PRESSION DE RUPTURE DE LA SURFACE SOUFLABLE À L'EXPLOSION DE 400 MBAR

Hypothèses :

	Hypothèses
Pression de rupture de la surface soufflable (mbar)	400
Masse surfacique de la surface soufflable (kg/m ²)	<250
Résistance minimale des parois (mbar)	800

Abaques :

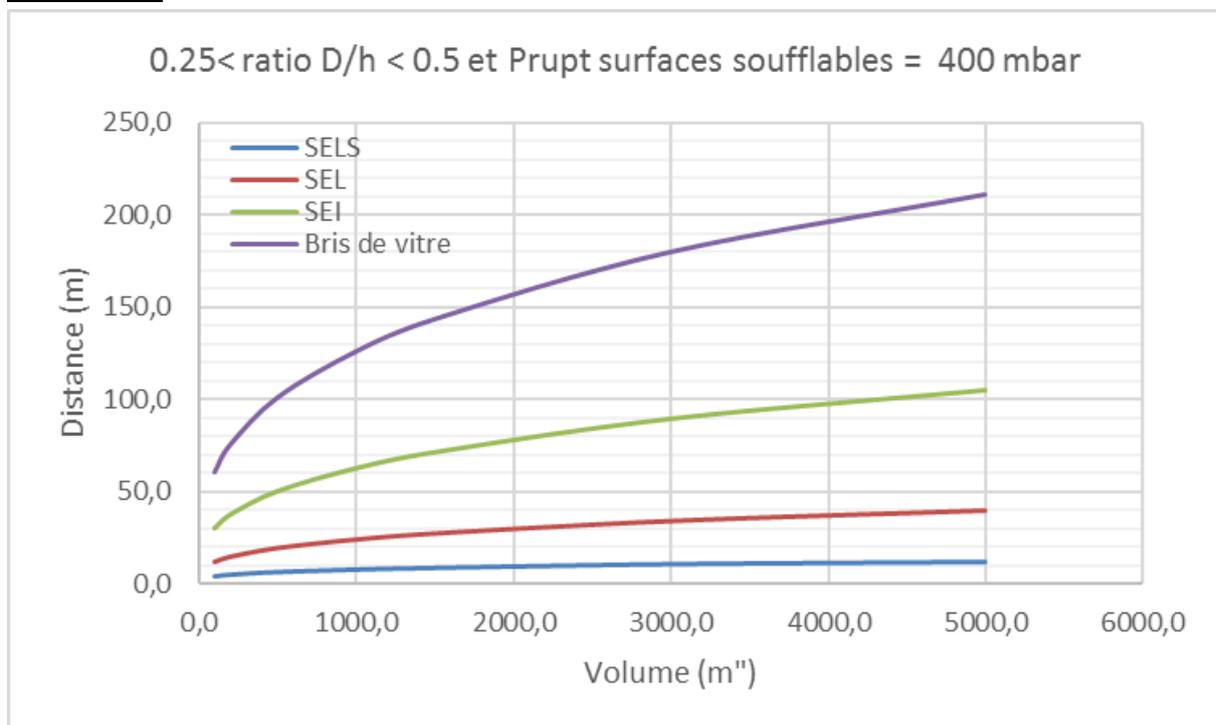


Figure 9: Explosion de poussières dans un silo vertical béton - Distances aux seuils d'effets de surpression (SEI en vert, SEL en rouge et SELS en bleu) en fonction du volume pour un ratio D/h compris entre 0,25 et 0,5 et pour une pression de rupture de la surface soufflable (toit) de 400 mbar

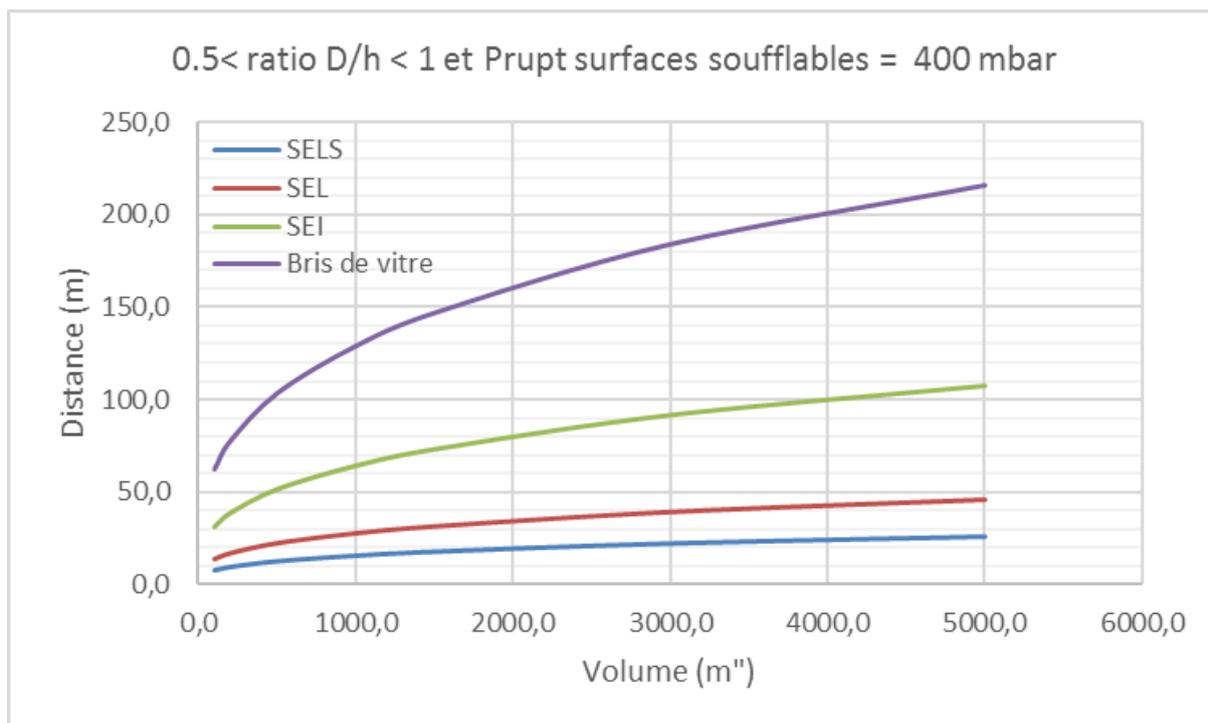


Figure 10: Explosion de poussières dans un silo vertical béton - Distances aux seuils d'effets de surpression (SEI en vert, SEL en rouge et SELS en bleu) en fonction du volume pour un ratio D/h compris entre 0,5 et 1 et pour une pression de rupture de la surface soufflable (toit) de 400 mbar

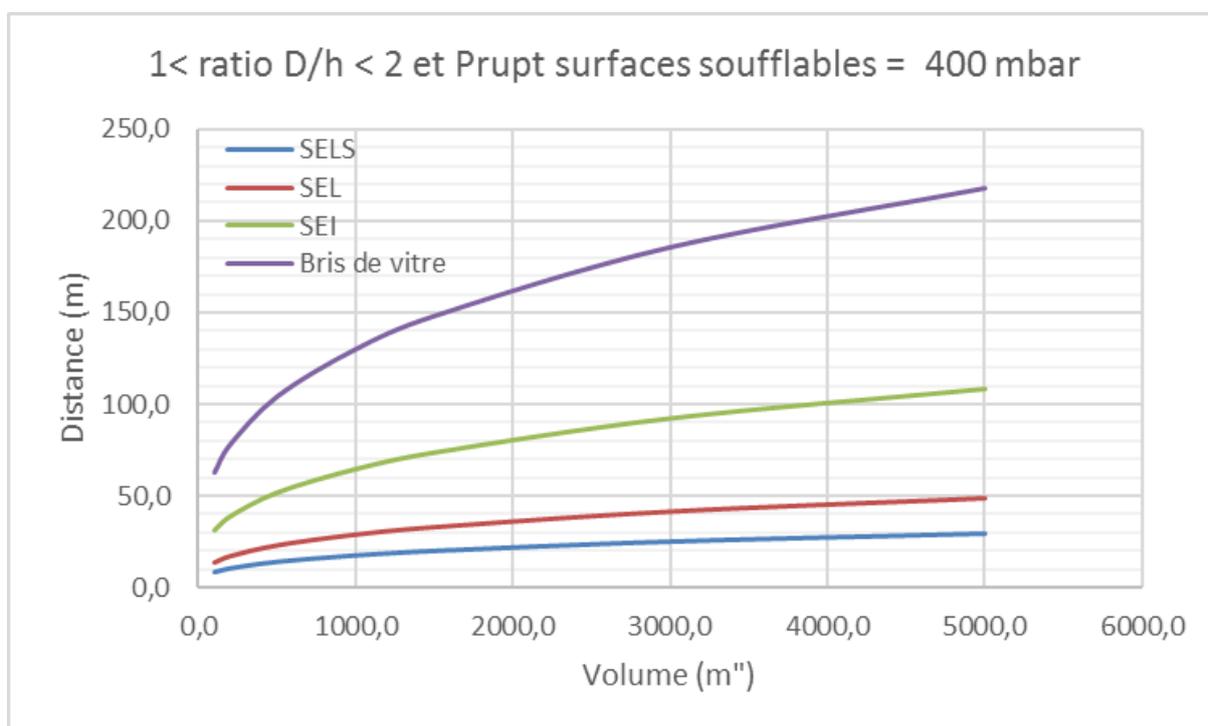


Figure 11: Explosion de poussières dans un silo vertical béton - Distances aux seuils d'effets de surpression (SEI en vert, SEL en rouge et SELS en bleu) en fonction du volume pour un ratio D/h compris entre 1 et 2 et pour une pression de rupture de la surface soufflable (toit) de 400 mbar

2.4.3 SILOS VERTICAUX MÉTALLIQUES

2.4.3.1 SILOS VERTICAUX MÉTALLIQUES AVEC UNE PRESSION DE RUPTURE À L'EXPLOSION DE 100 mBAR

Hypothèses :

	Hypothèses
Pression de rupture de la surface soufflable (mbar)	100
Masse surfacique de la surface soufflable (kg/m ²)	<10
Résistance minimale des parois (mbar)	200

Abaques :

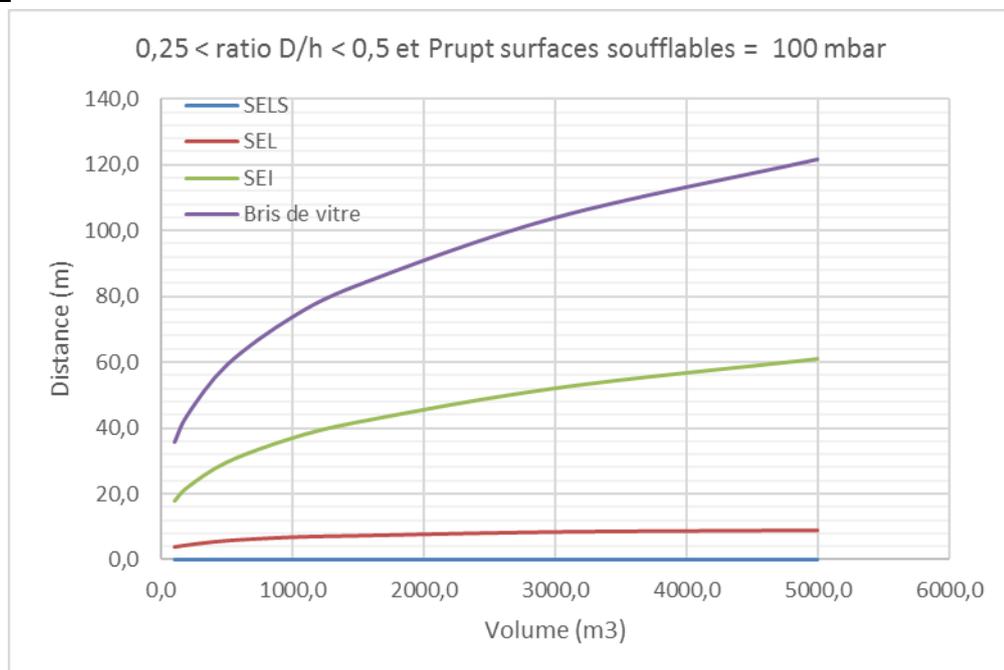


Figure 12: Explosion de poussières dans un silo vertical métallique– - Distances aux seuils d'effets de surpression (SEI en vert, SEL en rouge et SELS en bleu) en fonction du volume pour un ratio D/h compris entre 0,25 et 0,5 et pour une pression de rupture de la surface soufflable (toit) de 100 mbar

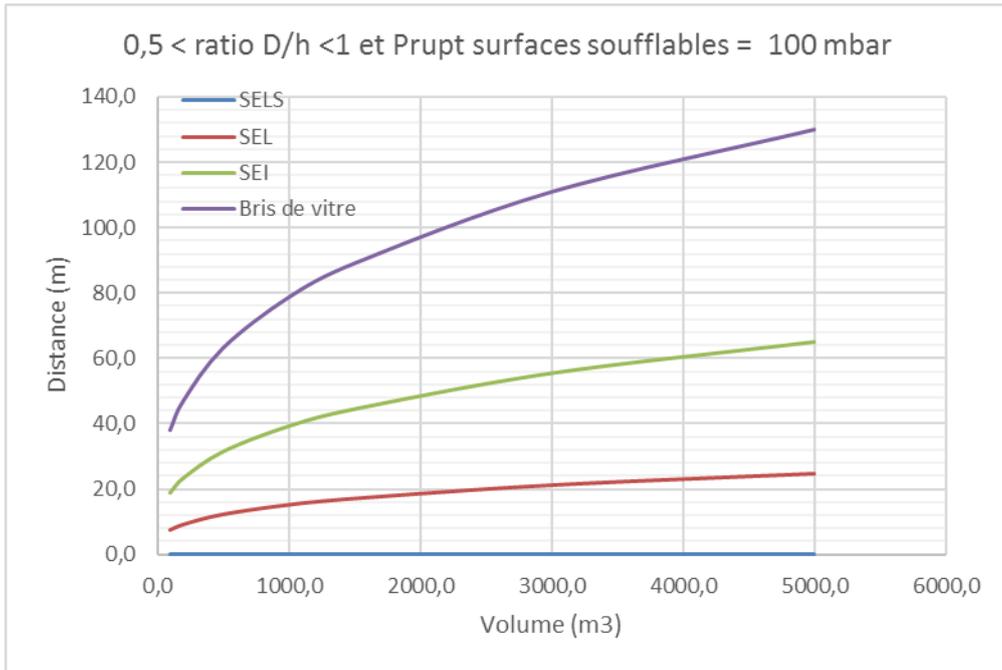


Figure 13: Explosion de poussières dans un silo vertical métallique– - Distances aux seuils d'effets de surpression (SEI en vert, SEL en rouge et SELS en bleu) en fonction du volume pour un ratio D/h compris entre 0,5 et 1 et pour une pression de rupture de la surface soufflable (toit) de 100 mbar

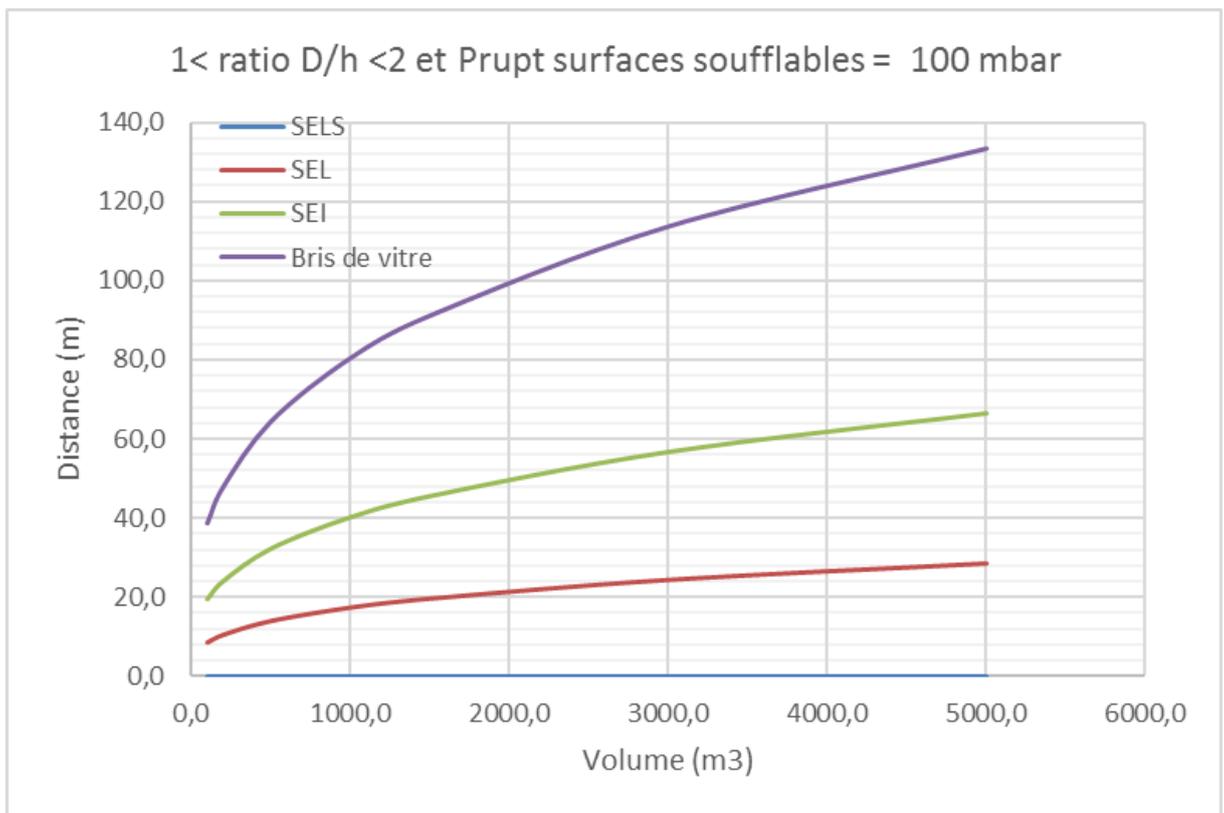


Figure 14: Explosion de poussières dans un silo vertical métallique– - Distances aux seuils d'effets de surpression (SEI en vert, SEL en rouge et SELS en bleu) en fonction du volume pour un ratio D/h compris entre 1 et 2 et pour une pression de rupture de la surface soufflable (toit) de 100 mbar

2.4.3.2 SILOS VERTICAUX MÉTALLIQUES AVEC UNE PRESSION DE RUPTURE À L'EXPLOSION DE 200 MBAR

Hypothèses :

	Hypothèses
Pression de rupture de la surface soufflable (mbar)	200
Masse surfacique de la surface soufflable (kg/m ²)	<15
Résistance minimale des parois (mbar)	400

Abaques :

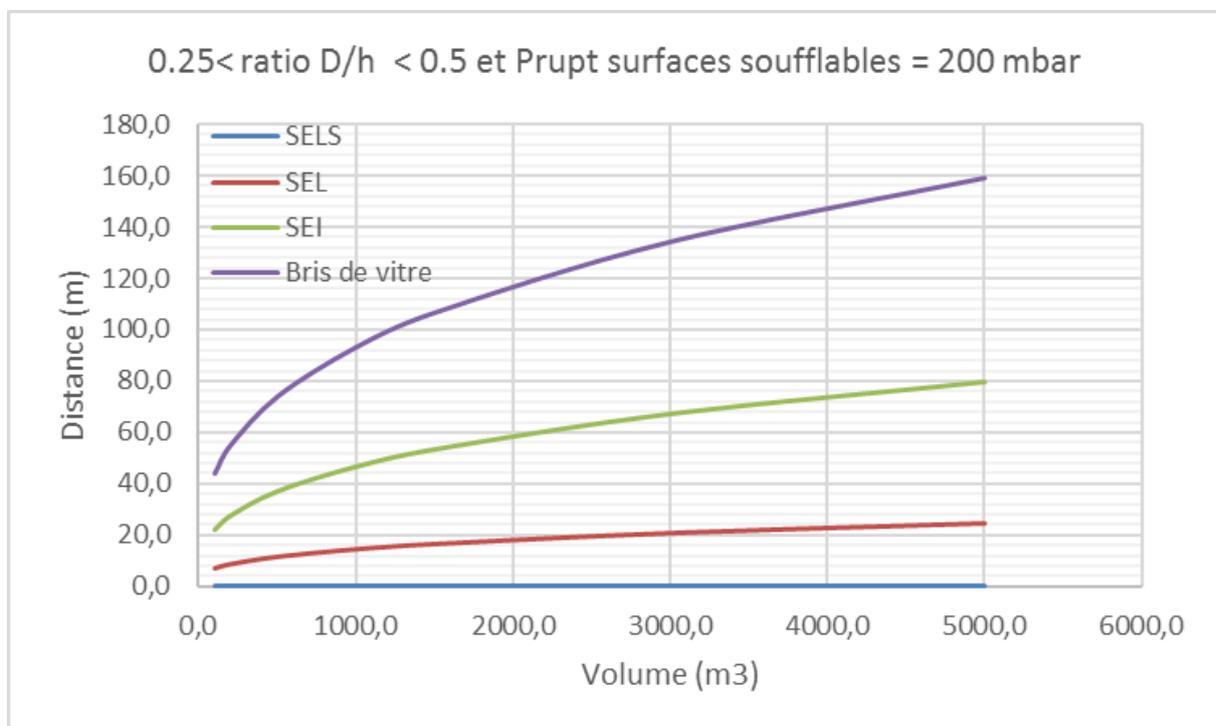


Figure 15: Explosion de poussières dans un silo vertical métallique- - Distances aux seuils d'effets de surpression (SEI en vert, SEL en rouge et SELS en bleu) en fonction du volume pour un ratio D/h compris entre 0,25 et 0,5 et pour une pression de rupture de la surface soufflable (toit) de 200 mbar

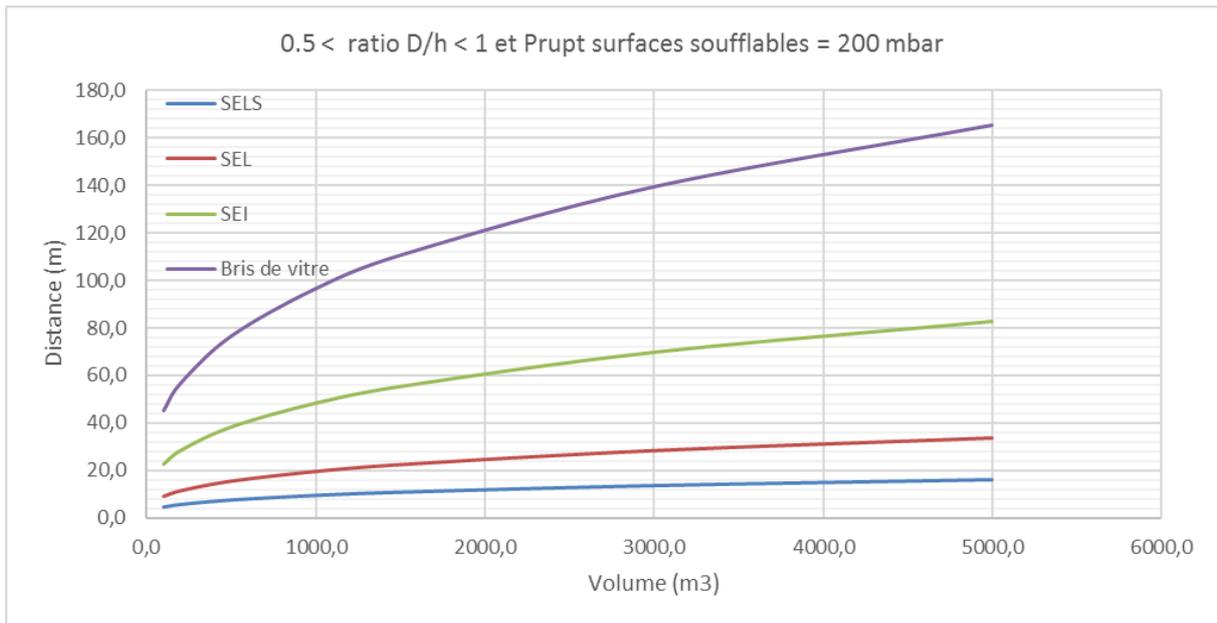


Figure 16: Explosion de poussières dans un silo vertical métallique– - Distances aux seuils d'effets de surpression (SEI en vert, SEL en rouge et SELS en bleu) en fonction du volume pour un ratio D/h compris entre 0,5 et 1 et pour une pression de rupture de la surface soufflable (toit) de 200 mbar

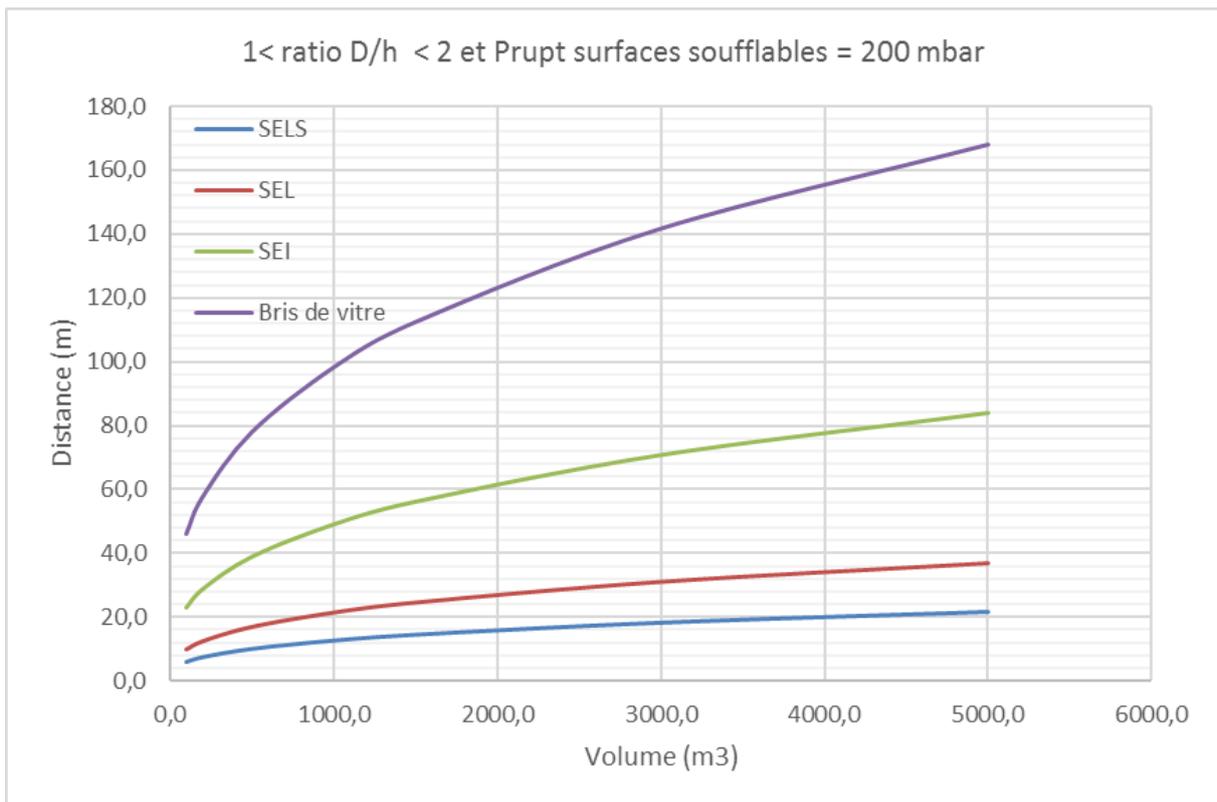


Figure 17: Explosion de poussières dans un silo vertical métallique– - Distances aux seuils d'effets de surpression (SEI en vert, SEL en rouge et SELS en bleu) en fonction du volume pour un ratio D/h compris entre 1 et 2 et pour une pression de rupture de la surface soufflable (toit) de 200 mbar

2.4.5 SILOS PLATS MÉTALLIQUES

2.4.5.1 SILOS PLATS MÉTALLIQUES AVEC UNE PRESSION DE RUPTURE À L'EXPLOSION DE 60 MBAR

Hypothèses :

	Hypothèses
Ratio D/h	>2
Pression de rupture de la surface soufflable (mbar)	60
Masse surfacique de la surface soufflable (kg/m ²)	<5
Résistance minimale des parois (mbar)	100

Abaques :

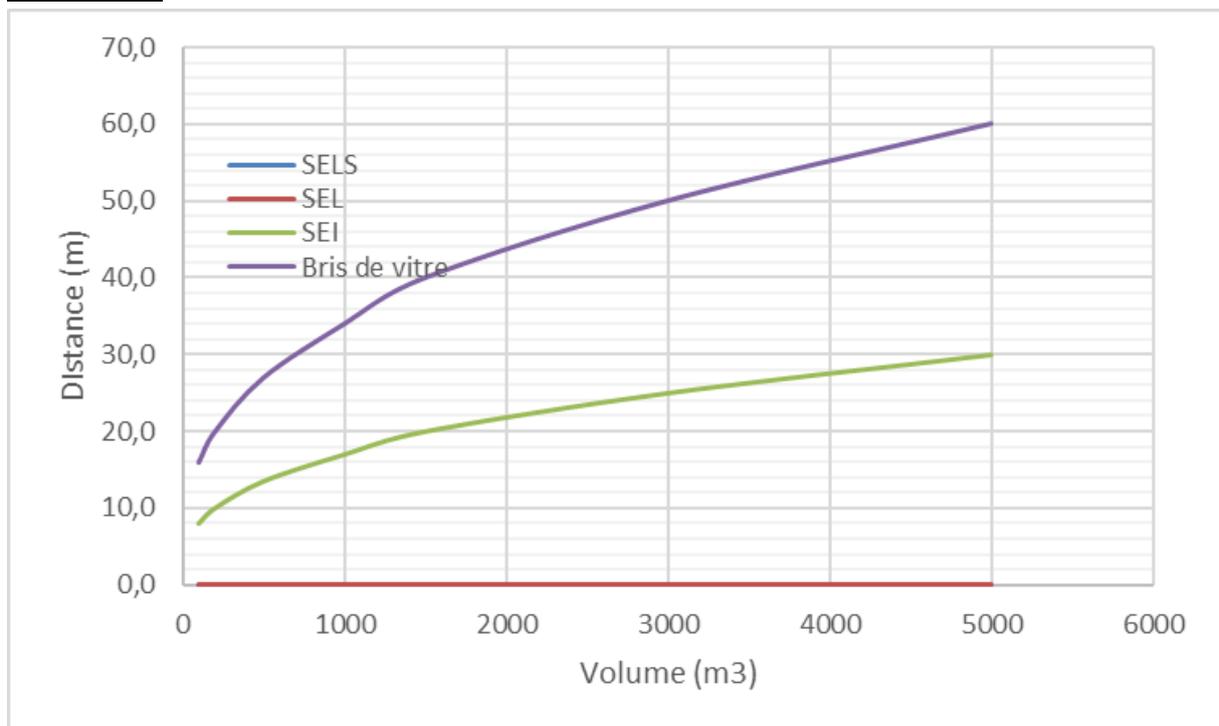


Figure 18: Explosion de poussières dans un silo plat métallique– - Distances aux seuils d'effets de surpression (SEI en vert, SEL en rouge et SELS en bleu) en fonction du volume du silo pour une pression de rupture de la surface soufflable (toit) de 60 mbar

2.4.5.3 SILOS PLATS MÉTALLIQUES AVEC UNE PRESSION DE RUPTURE À L'EXPLOSION DE 100 mBAR

Hypothèses :

	Hypothèses
Ratio D/h	>2
Pression de rupture de la surface soufflable (mbar)	200
Masse surfacique de la surface soufflable (kg/m ²)	<10
Résistance minimale des parois (mbar)	400

Abaques :

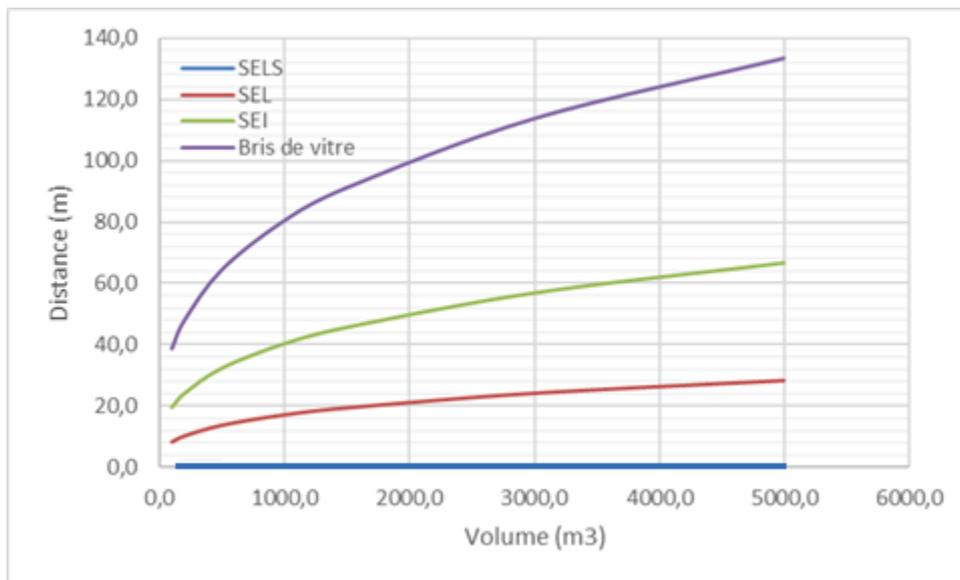


Figure 19: Explosion de poussières dans un silo plat métallique– - Distances aux seuils d'effets de surpression (SEI en vert, SEL en rouge et SELS en bleu) en fonction du volume du silo pour une pression de rupture de la surface soufflable (toit) de 100 mbar

2.6 CONCLUSION

Les effets de surpression associés à l'explosion de silos ont été évalués. Les différents silos considérés dans l'étude sont les silos plats et verticaux, en acier ou en béton. Plusieurs tailles de silos sont considérées, au moyen de leur volume et du ratio D/h (Diamètre / Hauteur).

- Dans le cas d'un silo vertical (métallique ou en béton) :
 - Pour un volume donné, plus le ratio D/h augmente, plus les distances d'effet sont importantes ;
 - Pour un ratio D/h donné, plus le volume augmente, plus les distances d'effet sont importantes ;
 - Dans le cas de silo métallique, la pression de rupture de la surface soufflable est plus faible que pour un silo en béton et les distances d'effets à volume donné et ratio D/h donné sont plus faibles ;
- Dans le cas d'un silo plat métallique, plus la pression de rupture de la surface soufflable augmente, plus les distances d'effet sont importantes : lorsque la pression de rupture de la surface soufflable passe de 60 à 100 mbars, pour un volume donné, les distances d'effet doublent.

3. INCENDIE DANS UN SILO

L'objectif de cette étude est de présenter des abaques simplifiés d'évaluation des effets thermique d'un incendie se déclarant dans un silo de biomasse.

Ce chapitre constitue la présentation des abaques de distance d'effets thermiques pour des incendies se déclarant sur 2 types de silos, verticaux et plats.

3.1 DESCRIPTION DE LA PHÉNOMÉNOLOGIE D'UN FEU DE SILO

Selon le délai d'intervention des secours, deux cas se présentent :

- L'incendie du silo est maîtrisé suffisamment tôt, sa structure reste intègre et seules les flammes fixées au-dessus du silo contribuent aux effets thermiques,
- L'incendie du silo n'est pas maîtrisé suffisamment tôt et la structure se fragilise et s'effondre. Le stockage de particules de bois enflammées forme alors un talus.

L'exploitant devra démontrer sa capacité à maîtriser les effets de l'incendie du silo avant effondrement ; dans le cas contraire, il devra prendre ne compte l'effondrement du silo pour la détermination des effets de l'incendie.

Les différentes configurations d'incendie envisagées sont présentées sur les figures suivantes.

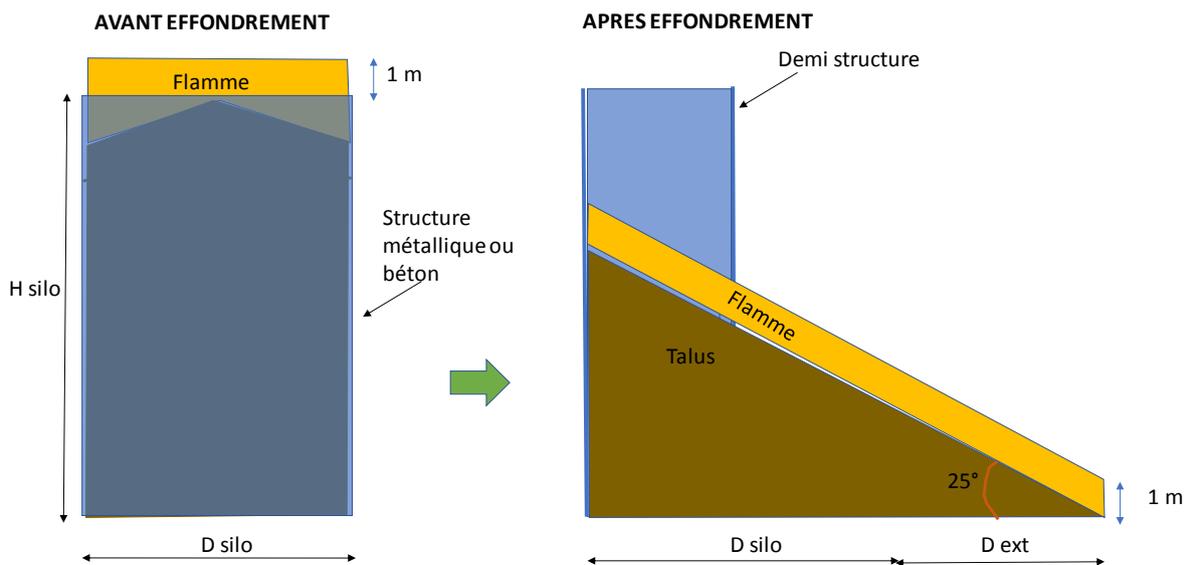


Figure 20 : Comportement au feu d'un silo vertical enflammé

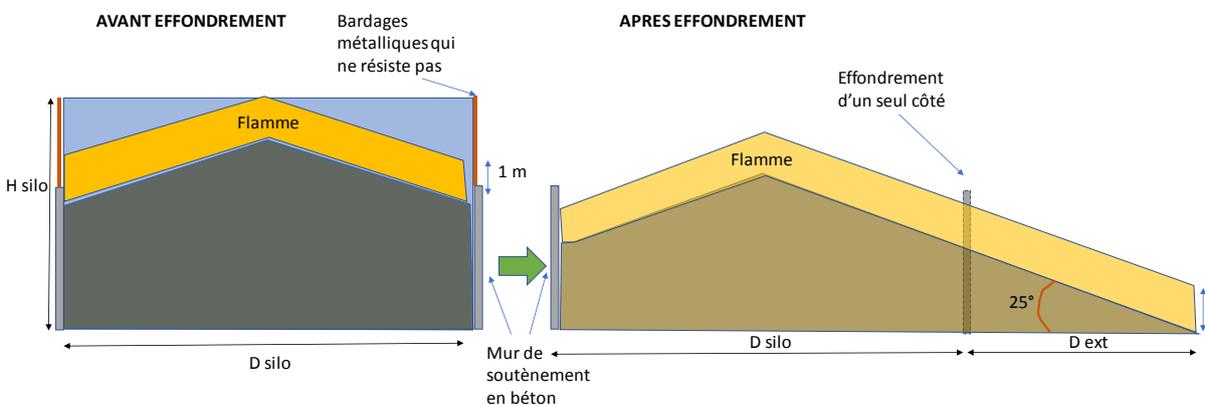


Figure 21 : Comportement au feu d'un silo plat enflammé

Dans les deux cas, il est considéré de manière majorante qu'après effondrement, une partie de la structure reste en place, comportement structurelle observé dans le retour d'expérience.

La faible oxygénation du feu liée à la compacité du tas de biomasse se traduit par une combustion qui a lieu en surface. Ce feu couvant est caractérisé par des hauteurs de flamme excédant rarement 1 m, d'après le retour d'expérience associé à ce type d'incendie.

L'angle de talutage après effondrement est fixé à 25°, valeur moyenne des angles de talutage pour les différents produits, d'après l'arrêté du 26/11/12 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations relevant du régime de l'enregistrement au titre de la rubrique n° 2160 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement.

3.2 DESCRIPTION DU CODE DE CALCUL

Les effets thermiques sont modélisés au moyen du modèle de la flamme solide développé par l'INERIS dans le code de calcul FNAP. Ce logiciel permet de déterminer la densité de flux thermique reçue par une cible plane et de surface élémentaire, exposée au rayonnement thermique d'un feu de type nappe, et située à une distance donnée du feu.

3.3 SCÉNARIOS ÉTUDIÉS

Les hypothèses de modélisations pour chaque type de silo sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Type de silo	Vertical	Plat
Volumes en m ³	[100 - 5000]	[100 - 5000]
Ratio (D/h)	Non pris en compte	[2, 3]
Nature des parois du silo	Métallique ou béton	Métallique ou béton

Tableau 4 : hypothèses géométriques associées aux scénarios d'incendie

Note : Les volumes modélisés sont les mêmes pour les silos plats et pour les silos verticaux. Toutefois, il est souligné que seuls les silos plats de hauteur inférieure à 10 m, avec des volumes compris entre 3140 et 5000 m³ et des ratios D/h compris entre 2 et 2,5 répondent à la définition de silo plat donnée dans l'arrêté du 29 mars 2004 relatif à la prévention des risques présentés par les silos².

Pour faciliter la lecture, les abaques des silos plats sont présentés pour chaque valeur de ratio, soit 2 et 3.

² D'après la définition de l'arrêté du 29 mars 2004 relatif à la prévention des risques présentés par les silos, un silo plat est un silo dont les capacités de stockage ont une hauteur des parois latérales retenant les produits inférieure ou égale à 10 mètres au-dessus du sol.

3.4 CARACTÉRISTIQUES DE L'INCENDIE

Les caractéristiques de l'incendie des particules de bois permettant d'évaluer les effets thermiques dans son environnement sont :

- la hauteur de flamme,
- l'émittance de flamme,
- le facteur de vue entre la flamme et la cible.

3.4.1 HAUTEUR DE FLAMME

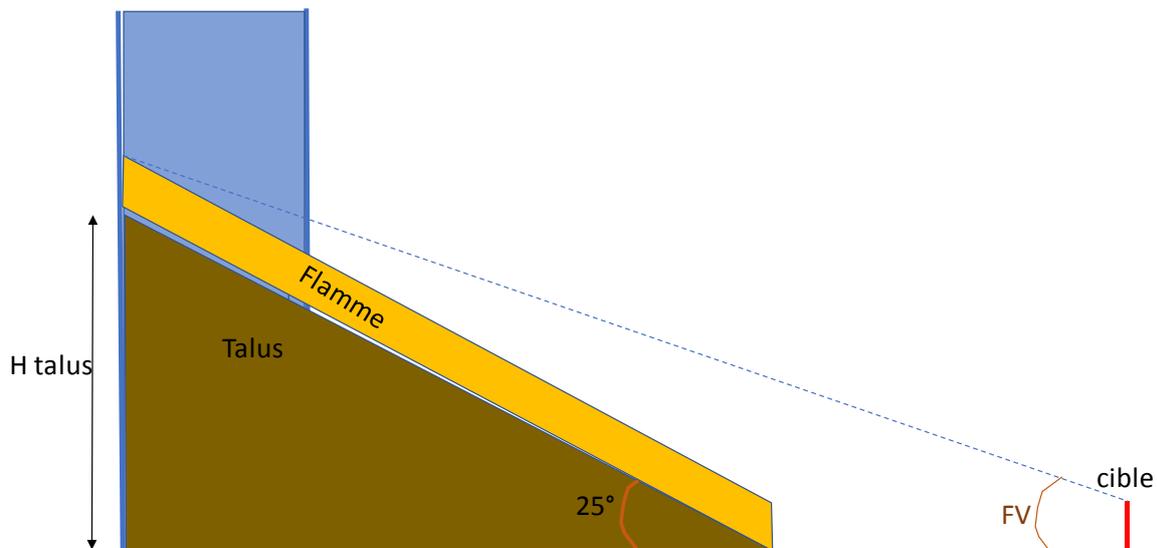
La flamme s'accroche sur la partie supérieure de l'îlot. La hauteur de la flamme est fixée à 1 m au-dessus du talus, hauteur maximale observée lors d'incendies se déclarant sur des tas de particules compactes combustibles.

3.4.2 EMISSION DE FLAMME

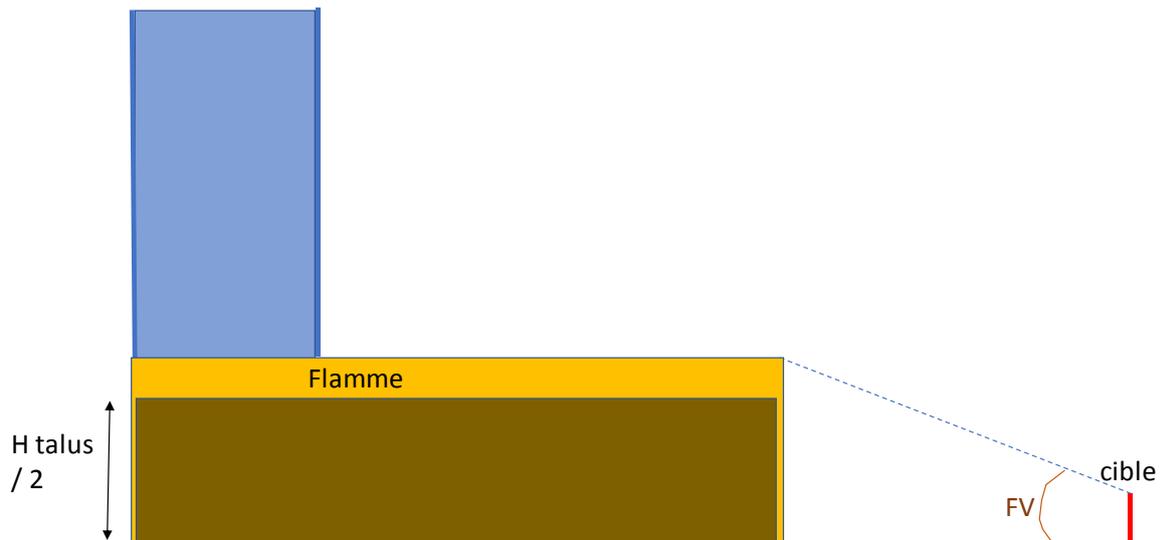
L'émittance de flamme est fixée à 25 kW/m², valeur mesurée sur des essais réalisés à l'INERIS sur des copeaux de bois.

3.4.3 FACTEUR DE VUE

Le facteur de vue entre la flamme et la cible pour un silo effondré est l'angle solide représenté par la figure suivante :



Afin de simplifier le calcul et notamment la détermination du facteur de vue, la forme de la flamme est assimilée à un cylindre d'une demi hauteur de talus tel que représenté par la figure suivante.



Cette deuxième configuration présente un facteur de vue équivalent à la première. L'approche est identique pour les silos plats.

3.5 PARAMÈTRES INFLUENTS

3.5.1 HAUTEUR DE LA CIBLE

La hauteur de la cible est fixée à 1,5 m par rapport au sol.

3.5.2 ATTÉNUATION ATMOSPHÉRIQUE

Le facteur d'atténuation atmosphérique est calculé au moyen de la formule de Brzustowki et Sommer³ avec une humidité relative fixée à 70%.

3.5.3 VITESSE DU VENT

Au regard de la faible hauteur de flamme estimée, la vitesse du vent n'est pas prise en compte dans les calculs.

3.6 RÉSULTATS

3.6.1 AVANT EFFONDREMENT

Les distances d'effets thermiques associées à l'incendie d'un silo quelconque avant effondrement sont inférieures à 5 m à partir de la paroi extérieure du silo pour les effets irréversibles et 2 m pour les effets létaux.

3.6.2 APRÈS EFFONDREMENT

3.6.2.1 SILOS VERTICAUX

Les distances d'effets associées à l'incendie d'un silo vertical, acier ou béton, après effondrement sont présentées sur la figure suivante.

³ Omega 2 – Rapport d'étude INERIS – Réf : DRA-14-141478-03176A - Modélisation de feux industriels – 14/03/2014

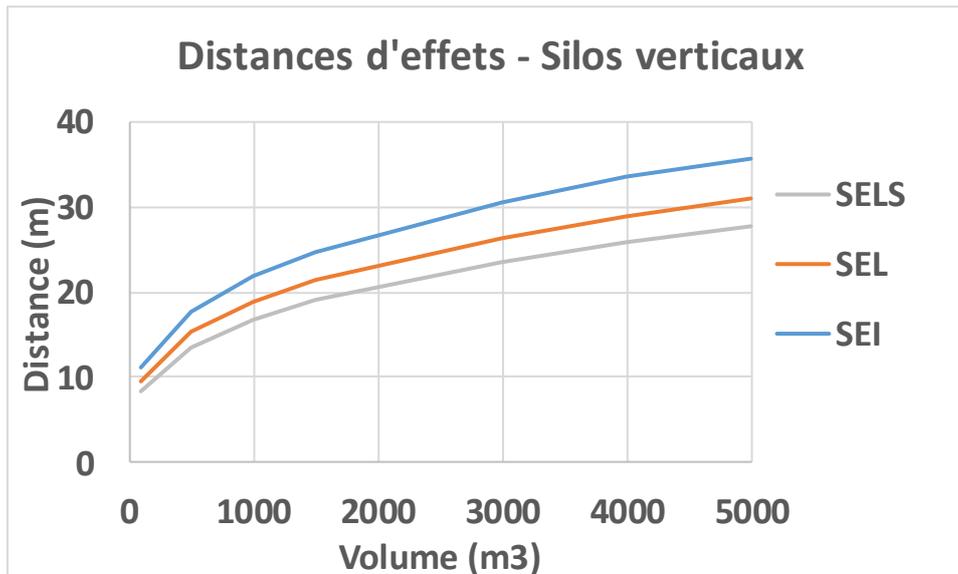


Figure 22: Incendie dans un silo vertical - Distances aux seuils d'effets thermiques (SEI en gris, SEL en orange et SELS en bleu) en fonction du volume du silo

Dans le cas des silos verticaux après effondrement, pour un volume fixé, quelles que soient les dimensions du silo, les distances d'effets sont sensiblement les mêmes. En effet, la forme du cône résultant ne dépend pas des dimensions initiales du silo mais du volume de particules de bois effondré.

3.6.2.2 SILOS PLATS

Les distances d'effets associées à l'incendie d'un silo de bois plat, acier ou béton, après effondrement sont présentées sur les figures suivantes.

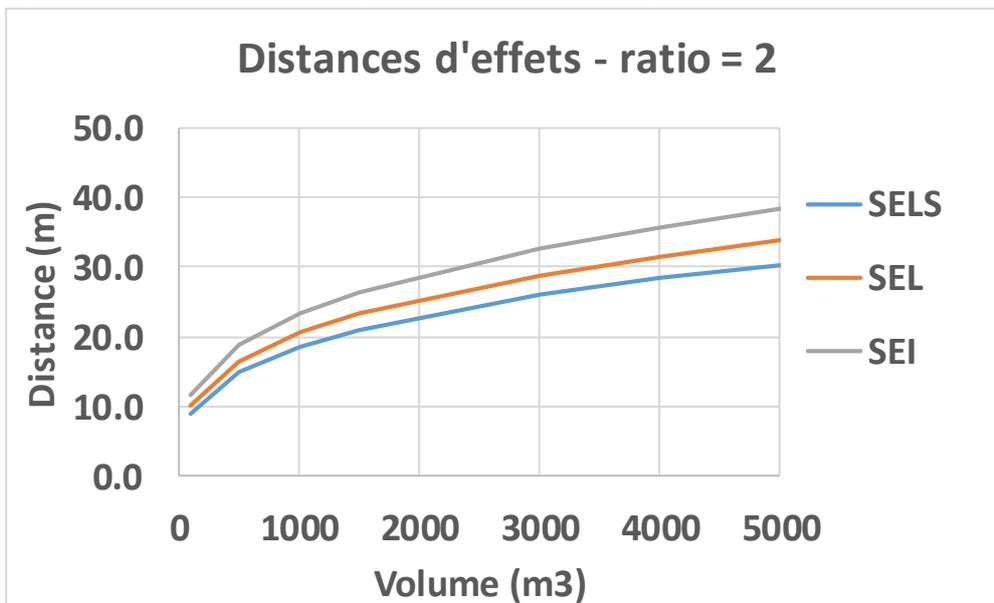


Figure 23: Incendie dans un silo plat - Distances aux seuils d'effets thermiques (SEI en gris, SEL en orange et SELS en bleu) en fonction du volume du silo pour un ratio D/h de 2

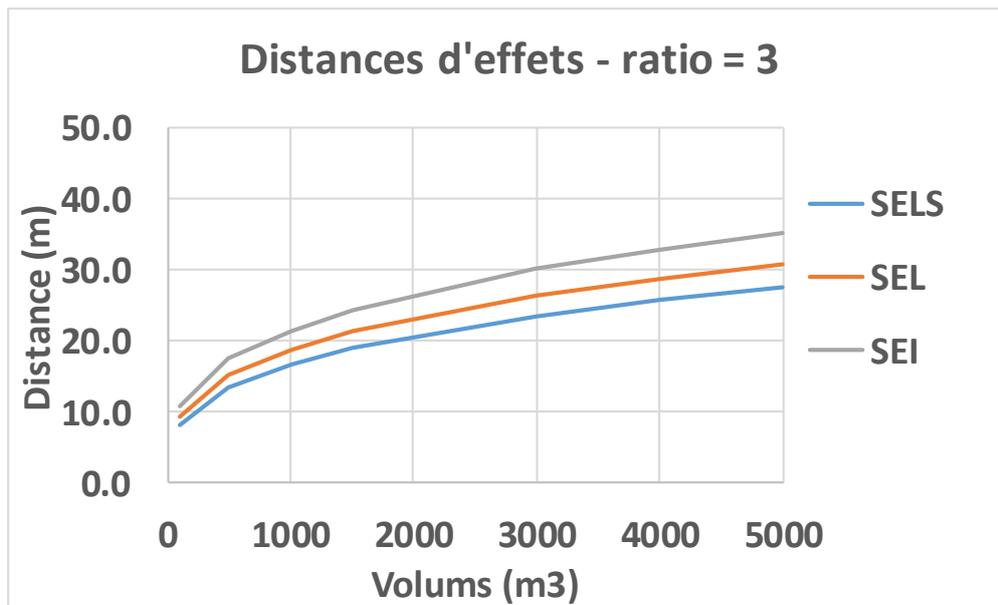


Figure 24: Incendie dans un silo plat - Distances aux seuils d'effets thermiques (SEI en gris, SEL en orange et SELS en bleu) en fonction du volume du silo pour un ratio D/h de 3

3.7 CONCLUSION

Les effets thermiques associés à l'incendie de silos avant et après effondrement ont été évalués. Les différents silos considérés dans l'étude sont les silos plats et verticaux, en acier ou en béton. Plusieurs tailles de silos sont considérées, au moyen de leur volume et du ratio D/h (Diamètre / Hauteur).

Les principaux résultats de l'étude sont :

- Avant effondrement, les distances d'effets thermiques associées à l'incendie d'un silo quelconque sont inférieures à 5 m à partir de la paroi extérieure du silo pour les effets irréversibles et 2 m pour les effets létaux.
- Après effondrement, les incendies des silos verticaux de mêmes volumes présentent des distances d'effets similaires quel que soit le ratio. Pour les plus gros silos de 5 000 m³, les distances aux effets irréversibles atteignent 35 m à partir du centre du silo et les distances aux effets létaux atteignent 31 m.
- Pour les plus gros silos de 5 000 m³, les incendies des silos plats présentent des distances d'effets au seuil d'effets irréversibles variant de 30 m (de 6 à 40 m) pour un ratio de 2. Les effets létaux atteignent respectivement 27 m et 30 m.

4. FONCTIONNEMENT DE LA CHAUDIÈRE

4.1 EXPLOSION DE LA CHAMBRE DE COMBUSTION (TE)

4.1.1 MÉTHODE DE CALCUL

Le scénario concerne l'explosion de la chambre de combustion. Au vu de ces intervalles de puissances, les volumes de chambre de combustion considérés pour une chaudière à tubes d'eau vont de 10 à 150 m³. En l'absence de données d'entrée sur la pression de rupture, sur la forme et sur les matériaux composant la chambre de combustion, le calcul est effectué à partir de l'hypothèse que la pression maximale est atteinte lors de l'explosion, cette pression est égale à 7.1 bar pour le méthane. Dans le cas où la pression de rupture de la chambre de combustion serait supérieure à cette valeur, les seuils de surpression ne seraient pas atteints. Les modélisations ont été réalisées à l'aide de l'outil PROJEX. La méthode de calcul est présentée dans le document Omega 15⁴ de l'INERIS.

4.1.2 RÉSULTATS

Les distances des effets de surpression d'une explosion de chaudière sont présentées sur le graphe suivant en fonction du volume de la chambre, les distances d'effet étant à prendre depuis le bord de la chaudière.

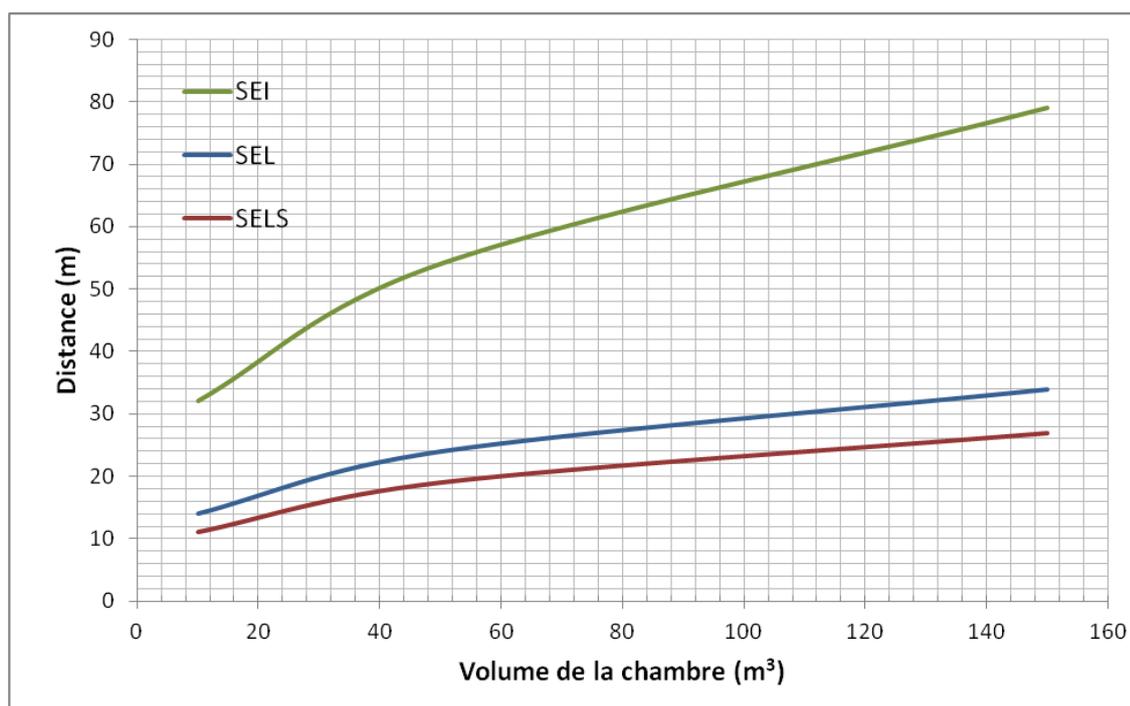


Figure 25 : Explosion de chambre de combustion (tubes d'eau) - Distances aux seuils d'effets de surpression (SEI en vert, SEL en bleu et SELS en rouge)

4.2 EXPLOSION DE LA CHAMBRE DE COMBUSTION (TF)

⁴ Omega 15- Les éclatements de réservoirs, Phénoménologie et modélisation des effets
référence : INERIS-DRA-2004-46055

4.2.1 DONNÉES D'ENTRÉE

Le scénario concerne l'explosion de la chambre de combustion. Il est considéré ici que la chambre de combustion a une forme cylindrique. La pression de rupture correspond à celle des extrémités du cylindre et donc dépend des dimensions et de l'épaisseur d'acier de la chambre. Les données d'entrée sont présentées dans le tableau suivant :

Volume de la chambre (m ³)	5	20	40
Longueur (m)	5	8	10
Diamètre (m)	1.1	1.8	2.3
Epaisseur des extrémités (m)	0.014	0.022	0.03
Pression de rupture (bar relatif)	1	1	1

Figure 26 : Données d'entrée

Les calculs ont été réalisés à l'aide de l'outil EFFEX (Annexe 6-3).

4.2.2 RÉSULTATS

Les distances des effets de suppression d'une explosion de chaudière sont présentées sur le graphe suivant en fonction du volume de la chambre, les distances d'effet étant à prendre depuis le bord de la chaudière.

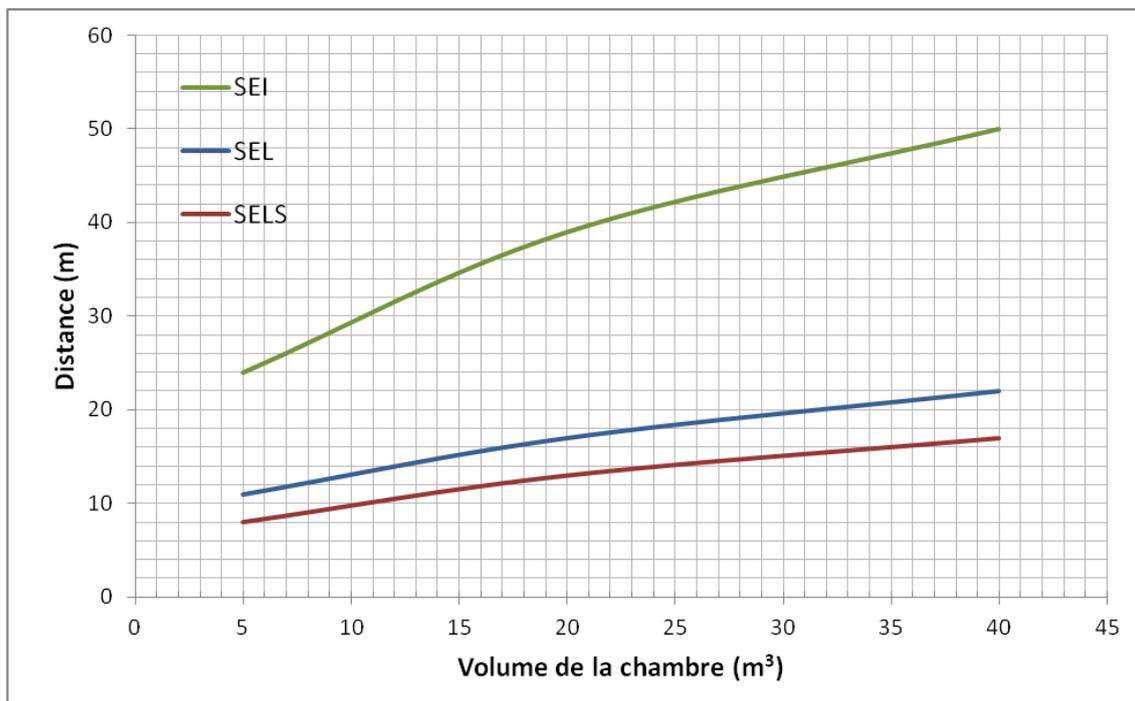


Figure 27: Explosion de chambre de combustion (tubes de fumée) - Distances aux seuils d'effets de suppression (SEI en vert, SEL en bleu et SELS en rouge)

4.4 BLEVE DE LA CAPACITÉ D'EAU

Les distances présentées dans ce paragraphe sont à considérer avec grande prudence pour les raisons suivantes :

- Elles ont été obtenues à l'aide de l'outil PROJEX dont les modèles sont en train d'être affinés. Les résultats ci-dessous ne sont pas représentatifs de la réalité physique du phénomène.
- Les résultats ci-dessous ont été obtenus pour un éclatement à l'air libre. L'effet atténuateur du local n'a pas été pris en compte.

4.4.1 DONNÉES D'ENTRÉE

Le scénario envisagé ici est le BLEVE d'un ballon d'eau. Les calculs ont été effectués en fonction du volume de la calandre pour trois pressions de rupture (10, 20 et 30 bar relatifs). Les calculs ont été réalisés à l'aide de l'outil PROJEX, la méthode est présentée dans le document oméga 15 de l'INERIS.

4.4.2 RÉSULTATS

Les distances des effets de suppression dues à un BLEVE d'un ballon d'eau sont présentées sur les graphes suivants, les distances d'effet étant à prendre depuis le bord des bâtiments.

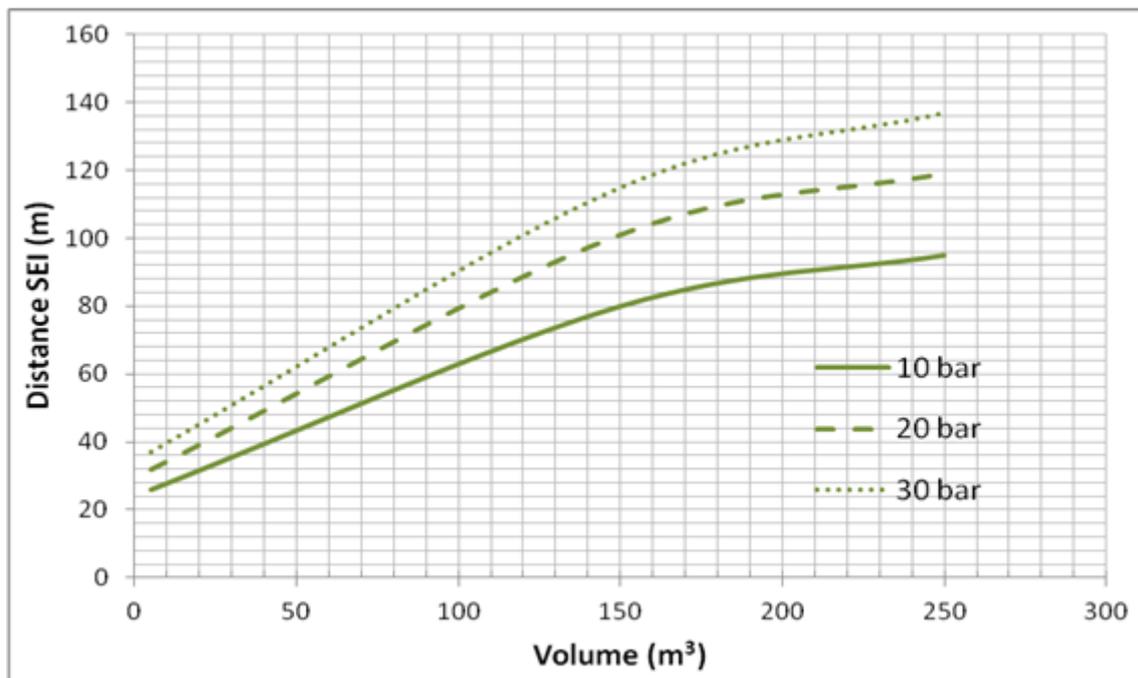


Figure 28: BLEVE – Evolution de la distance au SEI en fonction du volume pour 3 pressions de rupture : 10, 20 et 30 bar relatifs

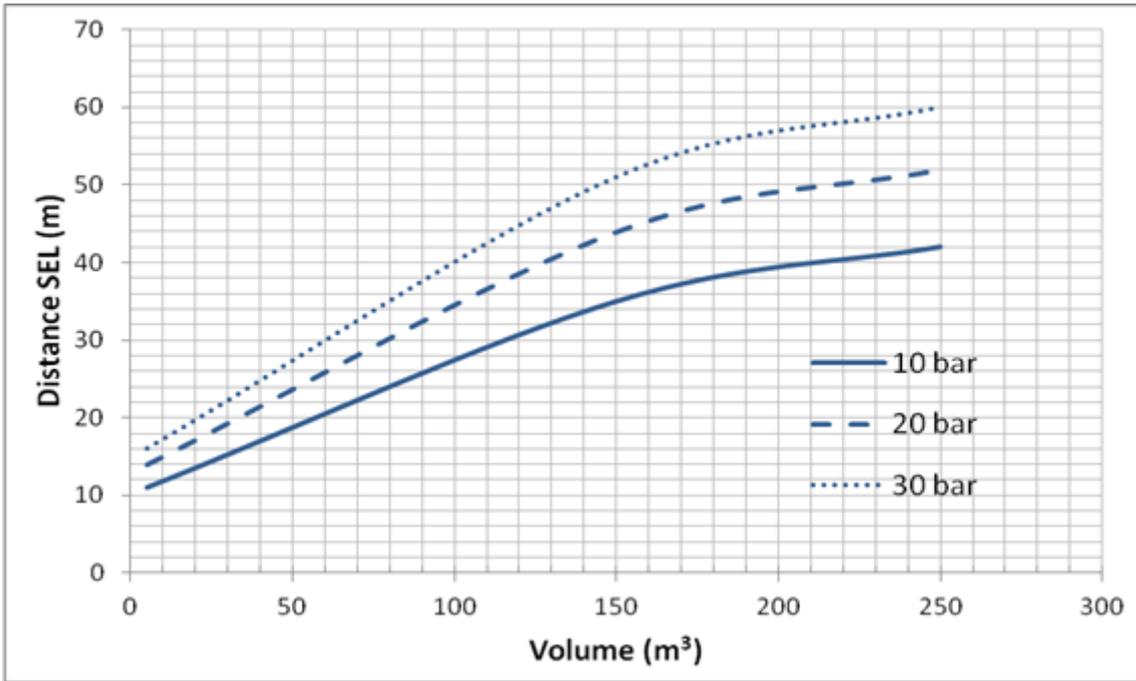


Figure 29: BLEVE – Evolution de la distance au SEL en fonction du volume pour 3 pressions de rupture : 10, 20 et 30 bar relatifs

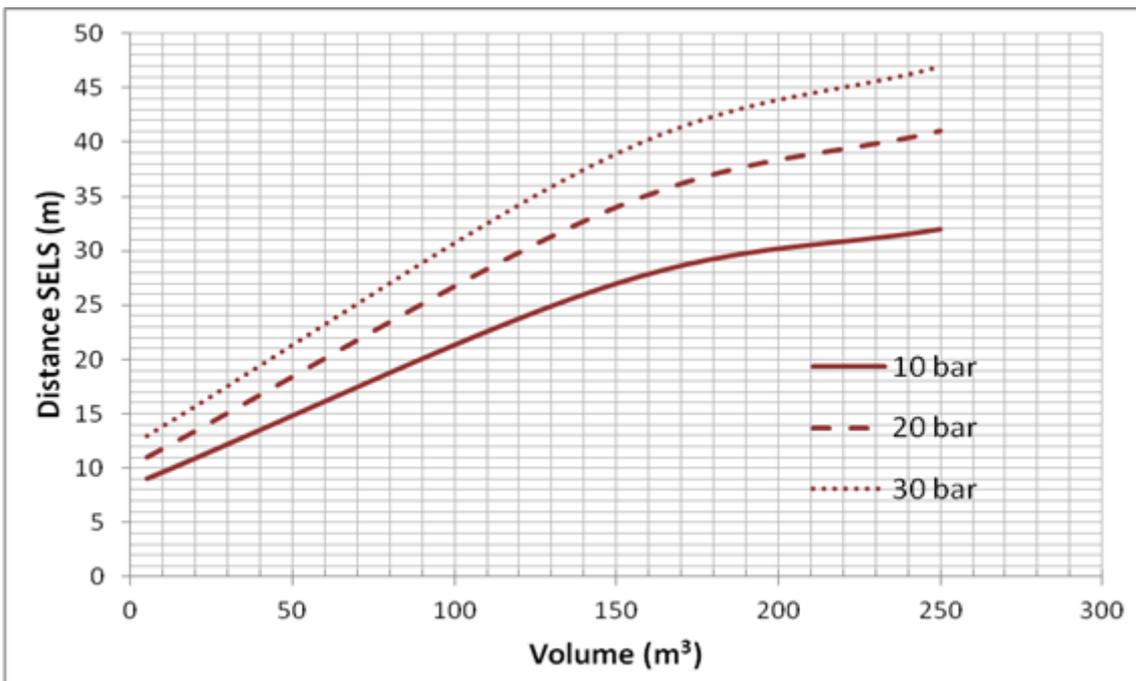


Figure 30: BLEVE – Evolution de la distance au SELS en fonction du volume pour 3 pressions de rupture : 10, 20 et 30 bar relatifs

4.6 CONCLUSION

Les effets de surpression associés à l'explosion de la chambre de combustion ont été évalués dans le cas des chaudières à tubes d'eau (TE) et des chaudières à tubes de fumées (TF).

Les principaux résultats de l'étude avec les hypothèses retenues sont :

- Pour les chaudières à TE dont le volume de chambre de combustion varie de 10 à 150 m³, les effets irréversibles varient de 30 à 80 m et les effets létaux significatifs de 10 à 25 m environ ;
- Pour les chaudières à TF dont le volume de chambre de combustion varie de 5 à 40 m³, les effets irréversibles varient de 25 à 50 m et les effets létaux significatifs de 10 à 20 m environ.

Les effets de surpression dues à un BLEVE d'un ballon d'eau ont été évalués pour des ballons dont le volume varie de 5 à 250 m³, avec des pressions de rupture de ces capacités comprises entre 10 et 30 bars.

Les principaux résultats de l'étude avec les hypothèses retenues sont :

- Pour une pression de rupture moyenne de 20 bars, avec la capacité du ballon variant de 5 à 250 m³, les effets irréversibles varient de 30 à 120 m et les effets létaux significatifs de 10 à 40 m environ ;
- Pour chaque seuil d'effet (SEI, SEL, SELS), plus le volume du ballon d'eau est petit, plus l'écart entre les distances d'effet obtenues pour les 3 pressions de rupture se réduit.

Par exemple, pour les effets irréversibles et pour un volume du ballon d'eau de 5 m³, l'écart entre les distances d'effet obtenues pour une pression de rupture du ballon variant de 10 à 30 bars est de 12 m environ ; cet écart est de 40 m pour un volume du ballon d'eau de 250 m³.

Annexe I

Éléments de probabilité des phénomènes dangereux relatifs aux chaufferies à biomasse

1. INTRODUCTION

Cette annexe donne des éléments permettant de déterminer la probabilité d'occurrence des phénomènes dangereux pouvant être générés par des installations de chaufferie. Elle présente des données disponibles dans des sources de données publiques, ces dernières n'étant pas spécifiques aux installations de chaufferie.

Les bases de données utilisées sont :

- FRED - Failure Rate and Event Data for use within Risk Assessments - Juin 2012
- Handboek Faalfrequenties - Appendix to Handbook failure frequencies - 2009
- Reference manual BEVI risk assessment - Janvier 2009
- Reldat - Hazardous Materials Release and Accident Frequencies for Process Plant - Septembre 2006
- ICSI - Résumé des travaux du groupe de travail « fréquence des événements initiateurs d'accidents et disponibilité des barrières de protection et de prévention » - juillet 2006 ;
- GTDLI - Guide de maîtrise des risques Technologiques dans les Dépôts de Liquides Inflammables - Octobre 2008
- OGP - International association of Oil & Gas Producers - Storage incident frequencies - Mars 2010
- SINTEF - OREDA (Offshore Reliability Database)

Les données sont présentées par type d'équipements :

- Capacités sous pression ;
- Echangeurs tubulaires ;

Note : Les bases de données publiques ne faisant pas spécifiquement référence aux équipements types chaudières, celles-ci peuvent être assimilées à ce type d'équipements.

2. FREQUENCES PAR TYPES D'EQUIPEMENTS

2.1 CAPACITES SOUS PRESSION

MODES DE DEFAILLANCE	INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES	FREQUENCE	UNITES	BASES DONNEES
Rupture catastrophique		2,00E-06 à 6,00E-06		FRED
Brèche	50 mm ϕ	5,00E-06		
	25 mm ϕ	5,00E-06		
	13 mm ϕ	1,00E-06		
	5 mm ϕ	4,00E-05		
Libération instantanée du contenant		5,00E-07		BEVI
Libération du contenant en 10 min		5,00E-07		
Brèche	10 mm ϕ	1,00E-05		Reidat
Rupture catastrophique		3,00E-06		
Brèche	10% ϕ	3,00E-05		
Brèche	2 mm ϕ	2,30E-05		OGP
	5 mm ϕ	1,20E-05		
	25 mm ϕ	7,10E-06		
	100 mm ϕ	4,30E-07		
Rupture catastrophique		4,70E-07		

Notes FRED :

Valeurs issues de l'industrie du chlore et du GPL. Pour des substances différentes, il est précisé que les valeurs sont des points de départ.

La rupture catastrophique sera plutôt 2.10^{-6} /an si la capacité suit des normes de construction telles que BS 5500.

Les effets externes (séisme, effets dominos, impacts par véhicules...) sont pris en compte à hauteur de 1.10^{-6} /an.

Notes BEVI:

Les valeurs incluent les fuites sur les piquages et 1ères brides.

Notes OGP :

La fréquence d'un BLEVE d'une capacité sous pression doit être calculée à partir de l'arbre des défaillances, en tenant compte des sources d'incendies adjacentes capables de causer cet événement. Des analyses antérieures montrent que la fréquence attendue pour un tel événement est comprise entre 10^{-7} et 10^{-5} par capacité par an.

2.2 ECHANGEURS TUBULAIRES

MODES DE DEFAILLANCE	INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES	FREQUENCE	UNITES	BASES DONNEES
Fuite externe		3,00E-02	/an	OREDA
Transfert thermique insuffisant		6,00E-02		
Lecture anormal d'instruments	type tubes - calandre, gaz/eau glycolée	3,90E-02		
Rupture simultanée de 10 tubes		1,00E-05		BEVI
Rupture d'un tube		1,00E-03		
Brèche par diamètre équivalent à 10% du diamètre du tube		1,00E-02		
Rupture d'un tube		7,10E-03		Handboek
Rupture de l'échangeur		1,30E-05		
Brèche dans la calandre	50 mm < ϕ ≤ 150 mm	1,60E-05		
	25 mm < ϕ ≤ 50 mm	3,90E-03		
	0 < ϕ ≤ 25 mm	6,00E-03		
Fuite niveau du tube		3,40E-02		Reldat
Fuite au niveau du joint		1,10E-02		

Note Handboek :

Il s'agit des valeurs pour des échangeurs tubulaires. Les valeurs sont données pour les fuites sur la calandre externe. Il est précisé que la brèche sur un tube conduira à une fuite dans la calandre mais qu'il faut vérifier la possibilité de brèche de la calandre résultant de la brèche de tubes. Si la brèche est possible, une fréquence de rupture de tubes de $7,1 \cdot 10^{-3}/\text{an}$ est retenue.

Note BEVI :

Dans tous les cas, les fuites sont supposées se faire à l'atmosphère.

Les valeurs retenues de fréquence correspondent à des échangeurs tubulaires dans lesquels la substance dangereuse est contenue dans les tubes et pour lesquels la pression design de la partie externe (calandre) est inférieure à celle de la pression côté substance dangereuse. Si la pression design de la partie externe était supérieure, la seule perte de confinement retenue serait celle de la rupture simultanée de 10 tubes avec une fréquence de $1 \cdot 10^{-6}/\text{an}$ (pour un échangeur avec fluide côté tubes).

Pour des échangeurs à plaques ou des échangeurs pour lesquels la substance dangereuse se trouve dans la calandre, les fréquences sont les suivantes :

- ruine instantanée : $5 \cdot 10^{-5}/\text{an}$;
- rejet complet en 10 minutes : $5 \cdot 10^{-5}/\text{an}$;
- Fuite par brèche de diamètre 10 mm : $1 \cdot 10^{-3}/\text{an}$.

Dans le cas où la substance se trouve dans les tubes mais aussi dans la calandre, d'autres données sont fournies dans le BEVI.

Note OREDA :

Pour les défaillances sur les échangeurs de type aéro (avec ventilateur), les valeurs indiquées sont les valeurs moyennes sur la base de la durée de fonctionnement. Le chiffre annuel est évalué en prenant le taux par heure (fourni par OREDA) multiplié par 8760 heures.

Note Reldat :

Observations faites sur une durée de deux ans pour des installations de chimie fine.

