



RE.CO.R.D.

ETUDE N° 02-0128/1A

SYNTHESE DE L'ETUDE

FRANÇAIS / ANGLAIS

**ÉMISSIONS DE POLLUANTS ENGENDRES PAR UN INCENDIE
DE STOCKAGE DE DECHETS COMBUSTIBLES : PROCESSUS
ASSOCIES DE DISSEMINATION DANS L'AIR, DANS LES
EAUX D'EXTINCTION D'INCENDIE ET EN RETOMBEES AU SOL**

juillet 2004

S. EVANNO - INERIS

TABLE DES MATIERES

1. CONTEXTE ET OBJECTIF DE L'ETUDE 4

2. EXPOSE ET ANALYSE DES PRINCIPAUX RESULTATS 5

2.1. Etape 1 : Retour d'Expérience des incendies sur les stockages de déchets. 5

2.2. Etape 2 : Recensement des différents processus pouvant conduire à un incendie sur un stockage de déchets..... 7

2.3. Etape 3 : Etude des polluants émis lors de la combustion des déchets. 8

2.4. Etape 4 : Présentation des différents transferts possibles de polluants. 12

2.5. Etape 5 : Etablissement d'un inventaire des moyens d'essais les plus adaptés à l'étude de l'impact environnemental d'un incendie de stockage de déchets. 13

1. CONTEXTE ET OBJECTIF DE L'ETUDE

La présente étude a été réalisée suite à la signature en date du 27 février 2003 d'un contrat de recherche, confié par l'association RE.CO.R.D à l'INERIS afin de traiter le sujet suivant :

« Emission de polluants engendrés par un incendie de stockage de déchets combustibles : processus associés de dissémination dans l'air, dans les eaux d'extinction d'incendie et en retombées au sol ».

Deux objectifs principaux ont été fixés entre les deux parties:

1^{er} objectif : Etablissement d'un état de l'art sur l'identification des polluants gazeux et particules résultant d'une combustion accidentelle d'un stockage de déchets combustibles

L'INERIS a apporté ses connaissances sur l'identification des termes sources et a utiliser l'état de l'art existant, notamment en se référant aux documents, notes, publications bibliographiques inhérents aux incendies de stockages de déchets combustibles disponibles dans la littérature ouverte.

Il a été convenu, entre les personnes présentes, que le 1^{er} objectif constitue la partie la plus importante du programme, tout en notant que le deuxième point du deuxième objectif présente un intérêt certain pour les adhérents de RECORD.

2^{ème} objectif : Identification des processus de transfert des polluants générés dans l'air, dans les eaux d'extinction et dans les sols.

En se limitant aux références bibliographiques relevant du domaine de l'incendie, pour rester cohérent avec les compétences de l'équipe chargée de l'étude et l'enveloppe budgétaire allouée, l'INERIS a identifié de façon générale l'influence du terme source en cas d'incendies de stockages de déchets sur la dispersion à l'air, aux eaux d'extinction et en retombées au sol.

L'importance de ces processus de transferts de polluants dans le cas des incendies a été traité par l'INERIS (à partir de l'état de l'art à notre disposition) sans pour autant analyser de façon précise les modes d'interaction et de modélisation de ces phénomènes (relevant d'autres disciplines scientifiques). Un examen de quelques retours d'expérience en matière d'incendies industriels ayant contaminés le milieu aquatique, le sol et l'air environnant [ex : Sandoz (Suisse, 1986), Afrique du sud (1995)] a permis d'étayer concrètement cette analyse.

2. EXPOSE ET ANALYSE DES PRINCIPAUX RESULTATS

2.1. ETAPE 1 : RETOUR D'EXPERIENCE DES INCENDIES SUR LES STOCKAGES DE DECHETS.

Les éléments bibliographiques relatifs aux incendies de stockages de déchets ne sont pas si nombreux. Ainsi, l'INERIS a élargi la recherche sur les produits et l'activité industrielle afin de collecter un retour d'expérience plus important. Il convient de signaler les faits marquants générateurs de déchets :

- Mise en œuvre d'outils de recherche de source d'information variées (bases de données multiples : réseau internet, Centre de Documentation INERIS, réseau de connaissance...) basée sur plusieurs critères (produits, type d'activité),
- Polarisation sur l'identification d'incendies générant des effets environnementaux significatifs,
- effets de pollution issus des constituants des déchets, par nature difficilement identifiable sans analyse élémentaire,
- nécessité de bien connaître la nature des déchets pour adapter les mesures de prévention et de protection contre les incendies de stockage de déchets combustibles.

Ainsi, nous avons assimilé le terme de déchet à tout produit pouvant être des matières premières, des produits intermédiaires ou des produits finis dont l'incendie d'un tel stockage pourrait émettre des composés polluants pour l'environnement.

Avec cette nouvelle approche, plusieurs incendies significatifs ont été identifiés en retenant les deux critères suivants :

- incendie ayant des effets de pollutions sur l'environnement (eau, air, sol),
- stockage de déchets importants.

On peut, in fine, considérer que les sources d'information bibliographiques recueillies concernent 5 principales familles de déchets :

- les ordures ménagères (en vrac),
- les résidus de broyage automobiles (RBA, produit broyé et/ou pulvérisé),
- les pneus (en vrac),
- les papiers (en vrac, stockés) et le bois (en vrac, sciures),
- les produits chimiques et dérivés (en vrac, en fût).

Du retour d'expérience, il ressort que les produits chimiques présentent des impacts thermiques et toxiques les plus importants pour l'environnement.

Les ordures ménagères présentent des risques d'incendie (feux de surface et feux couvants en profondeur par fermentation et auto-échauffement) et des risques d'explosion liés à la production de biogaz.

Les incendies de pneumatiques, à l'examen des sources bibliographiques recensées sont des feux très fréquents et qui affectent des stockages tant de produits que de produits usagers. Les références associées aux incendies de pneumatiques sont bien fournies et les plus accessibles.

Les émissions polluantes qui affectent l'air, les eaux et les sols sont d'autant plus visibles et rémanentes que ces feux, une fois établis, sont très difficiles à maîtriser et à éteindre en cas de stockage massif. Les émissions sont principalement des composés aromatiques plus ou moins lourds (produits de pyrolyse), des composés soufrés et métalliques, avec de nombreuses phases condensées ou condensables.

En revanche, pour ce type de déchets, l'état de l'art est consistant et des guides permettent une meilleure prévention / protection des risques des stockages de pneumatiques existants.

Pour les incendies de RBA, le retour d'expérience est limité mais réel. La nature divisé du stockage entraîne des phénomènes d'auto-échauffement avec peu d'effet thermique mais toxique dans le proche environnement. Et une pollution des eaux et des sols existe de part l'infiltration des produits de pyrolyse générés dans l'incendie.

L'impact environnemental des incendies de papiers et bois varie selon le compactage ou non des déchets et le fait qu'ils contiennent des produits traitants contenant des molécules chimiques potentiellement polluantes en cas d'incendie notamment le cas de bois traités).

L'INERIS présente dans le chapitre 2 du rapport final, les fiches de synthèse de retour d'expérience d'incendie de stockages de déchets : chaque fiche décrit, selon le type de déchet retenu, le comportement au feu d'un tel stockage ainsi que des recommandations de prévention et de protection.

2.2. ETAPE 2 : RECENSEMENT DES DIFFERENTS PROCESSUS POUVANT CONDUIRE A UN INCENDIE SUR UN STOCKAGE DE DECHETS.

Même limitée aux incendies industriels, l'étude de la naissance et du développement des feux représente un très vaste sujet. En premier lieu, la nature du combustible, qui peut-être gazeux, liquide ou solide dans ce type d'incendie, contribue à en diversifier les caractéristiques essentielles. La combustion des gaz est de très loin la mieux connue, et la naissance d'une flamme (inflammation) ou son développement (propagation) peuvent être décrits avec précision au moyen de modèles théoriques.

La combustion de liquides a été étudiée de longue date et passe, sauf rare exception, par l'établissement d'une flamme de diffusion où le produit liquide brûle en phase vapeur. Le transfert radiatif conditionne les "états d'équilibre" qui se mettent en place dans les incendies de grande dimension.

L'analyse des incendies de solides est plus complexe : en fait, de nombreux processus de décomposition (dégradation thermique) se produisent au sein même des phases solides sous l'action de la chaleur.

La quantité de chaleur dégagée lors d'une combustion est fonction du pouvoir calorifique et de la vitesse spécifique de combustion du matériau. Ces deux paramètres conditionnent le débit calorifique effectif (la puissance) de l'incendie, lequel est modulé par le rendement (généralement du processus de combustion).

L'étude de l'INERIS recense à ce stade les très nombreux paramètres (présentés en artie dans le tableau 1) qui conditionnent à la fois le déroulement des incendies de déchets et les émissions polluantes associées.

Type de déchets	Paramètres de combustion ayant une influence sur le terme source d'incendie
Feu de déchets combustible	Masse, composition élémentaire, dimension du stockage, vitesse de combustion, pouvoir calorifique, produits de combustion, puissance thermique
Feu de liquides inflammables	Dimension du stockage, vitesse de combustion, pouvoir calorifique, produits de combustion, puissance thermique
Feu de gaz inflammables (a)	Vitesse de combustion, pouvoir calorifique, puissance thermique

Tableau 1 : Paramètres de combustion nécessaire pour caractériser le terme source

(a) peu susceptible d'être concerné dans des incendies.

L'incendie d'un dépôt de produits solides combustibles peut être notamment amorcé par application d'une source extérieure d'inflammation (étincelle, point chaud, flamme nue), ou par auto-échauffement, qui dégénère vers un processus d'auto-inflammation du stockage.

Le déclenchement d'incendies par auto-inflammation de produits solides combustibles est régi par trois paramètres déterminants pouvant être associés ou non :

- les caractéristiques du produit (réactivité du produit, produit fermentable, produit qui possède des composés plus ou moins oxydables...),
- les conditions géométriques (taille, forme, rapport S/V) : la température d'auto-inflammation critique n'a de sens que si elle est associée au rapport S/V ,
- les conditions thermiques aux limites (température et durée de stockage).

Les produits sujets aux phénomènes d'auto-échauffement peuvent toutefois être stockés pendant une période limitée, à des températures supérieures à la température d'auto-inflammation critique déterminée pour le volume correspondant, à savoir sur une durée inférieure à la période d'induction déterminée.

En réalité, 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. Ces incendies 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.

Il faut enfin tenir compte du fait que la vitesse de propagation en profondeur des feux latents est très lente.

Les équations et les modèles présentés dans l'étape 2 du rapport final constituent des outils précieux permettent d'étudier les possibilités d'auto-échauffement de stockages de produits solides combustibles. Associés à une approche expérimentale qui reste le plus souvent indispensable afin de déterminer les données de base, ces calculs permettent de prévoir le comportement d'auto-échauffement de stockages de produits répondant aux conditions géométriques de stockage les plus diverses.

Enfin, dans le cadre de cette étude, l'INERIS a examiné les origines et les causes des incendies de décharges, notamment lié au biogaz produit dans les décharges. Toutefois, si le biogaz peut être à l'origine d'un incendie dans une décharge, d'autres matériaux combustibles présents sur le site peuvent aussi prendre feu pour venir enflammer le biogaz et/ou propager l'incendie. Une analyse bibliographique a été menée sur les causes d'apparition des sources d'inflammation d'origine interne et externe dans les stockages de déchets.

2.3. ÉTAPE 3 : ÉTUDE DES POLLUANTS EMIS LORS DE LA COMBUSTION DES DECHETS.

Il convient de rappeler que tout incendie conduit à l'émission de composés très divers qui se dénombrent par milliers.

Cette étude, restée relativement théorique, a été consolidée par l'analyse bibliographique qui a permis de mettre en évidence les composants majoritaires émis lors de la combustion de déchets en condition d'incendie. Les composants secondaires susceptibles d'être émis ainsi que les conditions particulières d'émission de ces composants ont été présentés. Par ailleurs, pour les composants majoritaires, les paramètres influent sur la formation de chacun de ces composants ont été identifiés.

Le tableau 3 indique les polluants gazeux émis lors d'un incendie de divers produits chimiques : il s'agit de données générales qui ont pour objectif de souligner qualitativement la variété des substances émises selon la famille du produit stockés. Evidemment, il faut souligner l'existence de polluants particuliers (suies,..) en complément de ces polluants gazeux.

Produits chimiques	Polluants émis
Plastiques chlorés	<ul style="list-style-type: none"> - HAP - Aliphatiques, benzène et dérivés - Aliphatiques chlorés - Dioxines et furanes - Métaux lourds
Plastiques non chlorés	<ul style="list-style-type: none"> - HAP, Aliphatiques, benzène et dérivés - Métaux lourds
Produits chimiques chlorés	<ul style="list-style-type: none"> - HAP, Aliphatiques, benzène et dérivés - Aliphatiques chlorés - Dioxines et furanes
Produits chimiques non chlorés	<ul style="list-style-type: none"> - HAP - Aliphatiques, benzène et dérivés
Pesticides organométalliques	<ul style="list-style-type: none"> - Série de composés organiques - Métaux lourds

Tableau 2 : Grandes familles de polluants émis lors d' incendies de divers produits chimiques

Les principaux produits concernés dans un incendie sont des composés carbonés, et les variations quantitatives des différents composés de combustion, dépendent des conditions thermiques de décomposition, de l'analyse élémentaire chimique du produit et du type d'incendie.

Les principaux scénarios de décomposition et les risques de développement du feu peuvent être classés en 3 catégories :

- **feu couvant** : ce type de feu implique de lentes décompositions thermiques à basse température sans flammes. Les produits de pyrolyse sont composés essentiellement en produits carbonés (environ 50% de la masse décomposée), de nature irritante pour les voies respiratoires. Les acides organiques sont également une source de gaz irritants dans ce genre d'incendie. A cause du développement lent de tels incendies, il existe rarement un risque mortel vis-à-vis des fumées de combustion en l'absence de confinement, sauf s'il y a des personnes endormies ou présentant des difficultés respiratoires dans le champ proche de l'incendie. Le principal problème serait une nuisance respiratoire pour les occupants à proximité de ce feu ;

- **feux ouverts (feux bien ventilés)** : ces feux ont lieu avec un excès d'air dans des espaces ouverts (le ratio combustible/air est faible). Dans ces conditions, la combustion est efficace de telle sorte que les principaux produits de combustion formés sont le dioxyde de carbone, l'eau et la chaleur (en cas de combustion de matières organiques avec peu d'hétéro-atomes). Le CO (minoritaire par rapport au dioxyde de carbone) et le CO₂ peuvent devenir dans ces incendies des produits toxiques significatifs, et d'autres produits inorganiques peuvent être émis sous formes de gaz acides. Des matériaux (par exemple : le bois traités...) ne brûlent pas complètement et produisent, en forte majorité, du CO et des gaz toxiques.

- **feux à ventilation contrôlée** : Ces feux ont lieu avec un défaut d'air et consistent en de petits incendies dans les locaux importants. La ventilation réduite entraîne des rejets de polluants importants en CO, CO₂, HCN, produits organiques, en fumée et en gaz acides inorganiques.

Les fumées toxiques issues d'un incendie sont identifiées en trois catégories :

- les polluants asphyxiants : ils représentent les gaz les plus dangereux et sont souvent les sources d'émissions toxiques responsables des décès constatés : les plus importants sont NO, H₂S, SO₂, HCN, CO ;
- Les polluants irritants : il s'agit des suies (composés microparticulaires polycycliques azotés et carbonés), des acides minéraux et des produits organiques irritants. Il en existe plus d'une vingtaine identifiable. La plupart des gaz acides inorganiques les plus fréquents dans les fumées d'incendie sont HCl, HBr, HF, NO_x, SO_x, P₂O₅. Les produits organiques irritants représentent des composés carbonés (formaldéhyde, acroléine, butyraldéhyde, acétaldéhyde, etc...), des dérivés de l'azote (NO, NH₃, isocyanate, amine) ;

- Les composés à "toxicité spécifiques " : ces composés à effet cancérigène, mutagène, allergisant, etc...sont généralement formés en quantité limitée dans le panache et ne conduisent généralement pas à des effets aigus (avec manifestations visibles en temps réels de la toxicité) mais peuvent présenter des effets toxiques à long terme (benzène, dioxine, dibenzofurane...).

Les polluants asphyxiants et irritants conditionnent le risque de toxicité aiguë associés aux incendies et plus précisément (selon les produits émis et la durée d'exposition) le risque léthal et d'incapacitation.

Les polluants à "toxicité spécifique" se caractérisent par l'absence de notions de seuils critiques et des effets potentiels qui se manifestent uniquement sur le long terme. Ce dernier propos est bien évidemment une signification drastique de la problématique de la toxicité des fumées d'incendie.

Les composés toxiques sont issus des produits de combustion « standards » (produits par la majorité des matériaux) et en particulier les substances engendrées par les incendies de stockages.

Enfin, la pollution par entraînement de produits contaminants par les eaux d'extinction a été abordée : effectivement, les eaux d'extinction des feux chimiques polluent (en l'absence de « barrières » telles les bassin de rétention d'eau d'extinction) :

- par entraînement de produits contaminants (dissous ou non) vers le réseau hydrologique (rivière, lac, eau souterraine, nappe phréatique, mer...) : écotoxicité directe ou indirecte ;
- du fait également de l'impact potentiel de certains additifs (agents tensio-actifs notamment) contenus dans les émulseurs (émulseurs de tous types, fluorés en particulier).

2.4. ÉTAPE 4 : PRESENTATION DES DIFFERENTS TRANSFERTS POSSIBLES DE POLLUANTS.

Les processus de transfert des polluants émis dans l'air par des incendies est un phénomène très complexe, notamment du fait des mécanismes amont qui régissent leur productions (réactions de pyrolyse / combustion, migration, transformation de certains polluants à l'intérieur du panache).

Pour évaluer les distances sous le vent d'un incendie en deçà desquelles des effets sur la santé humaine, liés à la toxicité des fumées, pourraient être ressentis, la démarche en quatre étapes présentée ci-après est intéressante :

1. Caractérisation du terme source de l'incendie ;
2. Caractérisation de la toxicité aiguë des fumées d'incendie au moyen de seuils critiques correspondant à l'apparition d'un effet donné sur la santé humaine (létalité 1% ; limite des effets irréversibles pour la santé) ;
3. Caractérisation de la source d'émission des polluants toxiques, c'est-à-dire, entre autres, hauteur, vitesse et température d'émission des fumées rejetées à l'atmosphère ;
4. Calcul de la dispersion atmosphérique et notamment des niveaux maximum de concentration en gaz toxiques au niveau du sol.

Les processus de transfert des polluants dans les sols et les milieux aquatiques sont guères plus simples. Un guide sur le comportement des polluants dans le sol et les nappes a été édité par les Editions BRGM en 2001.

Ce guide évoque les différents facteurs qui influent sur le comportement des polluants dans les sols et notamment ceux qui contrôlent le transfert des polluants vers les ressources en eau souterraine. Le comportement d'un polluant dans le sol et dans le sous-sol dépend directement de ses propriétés intrinsèques. Tous les polluants présents lors d'une pollution diffuse ou chronique ne se comportera donc pas de la même manière.

D'une manière générale, l'interaction entre les polluants et les milieux traversés (sol et sous-sol) aboutira à ralentir la migration du polluant. L'impact de ces polluants sur le milieu souterrain dépend en outre de ses caractéristiques spécifiques à l'échelle locale (perméabilité, porosité, teneur en eau, etc...), ainsi que des variations spatiales de ces grandeurs. Le transfert de la pollution sera donc plus lent ou atténué par rapport au transfert de l'eau à travers le milieu. Cette atténuation, ou ce retard, dépend à la fois des propriétés des substances polluantes et de celles des milieux. Ces propriétés doivent être reconnues avant le choix d'un modèle de transfert.

2.5. ÉTAPE 5 : ÉTABLISSEMENT D'UN INVENTAIRE DES MOYENS D'ESSAIS LES PLUS ADAPTES A L'ÉTUDE DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL D'UN INCENDIE DE STOCKAGE DE DECHETS.

L'importante question des essais au feu constituent, aujourd'hui, eu égard à la complexité des phénomènes mis en jeu par le feu, l'un des outils fondamentaux à la disposition des différents acteurs de la sécurité incendie en atmosphère confinée.

Nous rappelons que l'analyse en atmosphère confinée (avec ou sans l'aide d'essais) doit prendre en compte en première approximation quatre aspects :

- La sévérité de l'impact thermique accru par le confinement (rayonnement direct, effets radiatifs, convectifs et conductifs engendrés par le foyer d'incendie),
- L'impact chimique et toxique potentiel des fumées générées par le feu (incapacitation ou risque léthal pour les individus...),
- L'opacité des fumées et corrélativement la réduction de la visibilité, pouvant impliquer drastiquement les opérations de sauvetage et engendre un effet « panique » des personnes prises au piège,
- La corrosivité des fumées susceptibles avec un effet retard plus ou moins long d'affecter le fonctionnement des équipements (matériels électriques...).

Au regard des questions soulevées par l'objet global de cette étude, les essais (ou familles d'essais) permettant de qualifier les polluants doivent apporter des réponses concrètes aux aspects suivants :

1. Connaissance du produit notamment la composition élémentaire, le pouvoir calorifique, la teneur moyenne en humidité. Ces données sont caractérisées à l'aide des essais normalisés bien connus et accessibles dans de nombreux laboratoires (dont ceux de l'INERIS) ;
2. Connaissance de la réactivité au feu des produits allumabilité, propagation, phénoménologie globale). Ces données sont accessibles (sauf exception), par des moyens d'essais dédiés au risque incendie à l'échelle du laboratoire (famille des calorimètres tels que le cône calorimètre, le calorimètre de Tewarson, les fours tubulaires, les essais en grand).) ;
3. Quantification des paramètres nécessaires (aspects thermiques et chimiques) à la description d'un scénario d'incendie sous la forme d'un terme « source » de pollution de l'air, des eaux et des sols. Ces données sont accessibles par des essais en laboratoire utiles (calorimètres incendie) mais un « calage » est parfois nécessaire par des essais en grand.

Les essais et d'une façon plus générale la démarche expérimentale restent, malgré les avancées certaines de la modélisation, des outils incontournables pour une bonne maîtrise du risque incendie et de ses différentes composantes. Dans le cas des déchets (par nature très hétérogène), l'approche expérimentale est d'autant plus pertinente que ces produits peuvent conduire à des phénomènes atypiques et du fait que leurs caractéristiques sont davantage variables par rapport à des produits nobles.

TABLE OF CONTENTS

1. CONTEXT AND PURPOSE OF STUDY 4

2. DESCRIPTION AND ANALYSIS OF MAIN RESULTS 5

2.1. Stage 1: Feedback from fires on waste storage facilities..... 5

2.2. Stage 2: Inventory of the different processes liable to result in a fire on a waste storage facility.
..... 7

2.3. Stage 3: Study of pollutants emitted during waste combustion. 9

2.4. Stage 4: Overview of the various possible pollutant transfers. 12

2.5. Stage 5: Drafting of an inventory of the most suitable test methods for the study of the
environmental impact of a waste storage facility fire..... 13

1. CONTEXT AND PURPOSE OF STUDY

This study was conducted following the signature dated 27 February 2003 of a research contract, assigned by Association RE.CO.R.D to INERIS on the following subject:

"Emission of pollutants generated by combustible waste storage facility fires: associated dissemination processes in air, fire extinguishing water and soil fallout".

Two main objectives were defined by the two parties:

First objective: Definition of state of the art on the identification of gaseous pollutants and particles resulting from an accidental fire in a combustible waste storage facility

INERIS has provided its know-how on the identification of source terms and the use of the existing state of the art, particularly with reference to the documents, notes, bibliographic publications inherent to combustible waste storage facility fires available in the published literature.

It was agreed by the parties present that the first objective represents the most important part of the programme, while noting that the second objective represents a clear benefit for RECORD members.

Second objective: Identification of generated pollutant transfer processes in air, extinguishing water and soil.

By restricting itself to the bibliographic references related to the field of fires, to remain consistent with the skills of the team responsible for the study and the budgeted sum allocated, INERIS generally identified the influence of the source term in the event of waste storage facility fires on dispersal in air, extinguishing water and soil fallout.

The importance of these pollutant transfer processes in the event of fires was dealt with by INERIS (on the basis of the state of the art at our disposal) without precisely analysing the interaction and modelling methods of these phenomena (covered by other scientific fields). An examination of some feedback relating to industrial fires that have contaminated the aquatic environment, soil and surrounding air [e.g.: Sandoz (Switzerland, 1986), South Africa (1995)] provided concrete support for this analysis.

2. DESCRIPTION AND ANALYSIS OF MAIN RESULTS

2.1. STAGE 1: FEEDBACK FROM FIRES ON WASTE STORAGE FACILITIES.

The bibliographic documents relating to waste storage facility fires are not extensive. Therefore, INERIS broadened the research on substances and industrial activity in order to compile more extensive feedback. It is important to note the main points with respect to waste generation:

- Use of a variety of information source research tools (multiple databases: Internet, INERIS Documentation Centre, knowledge network, etc.) based on several criteria (substances, type of activity),
- Concentration on the identification of fires generating significant environmental effects,
- pollution effects from waste constituents, by nature difficult to identify without an elementary analysis,
- need to determine the nature of the waste to adapt combustible waste storage facility fire prevention and protection measures.

In this way, we classified the term waste as any substance that could consist of raw materials, intermediates or finished products for which a fire in such a storage facility was liable to emit environmentally polluting compounds.

With this new approach, several significant fires were identified using the following two criteria:

- fire with pollution effects on the environment (water, air, soil),
- large waste storage facilities.

Finally, it is possible to consider that the sources of bibliographic information compiled relate to 5 main categories of waste:

- household waste (bulk),
- automobile crushing residue (ACR, crushed and/or ground product),
- tyres (bulk),
- paper (bulk, stored) and wood (bulk, sawdust),
- chemicals and derivatives (bulk, barrels).

From the feedback, it has emerged that chemicals represent the greatest thermal and toxic impacts for the environment.

Household waste represents fire hazards (surface fires and core smouldering fires by fermentation and self-heating) and explosion hazards due to biogas production.

Tyre fires, upon examining the compiled bibliographic sources, are very frequent fires that affect storage facilities of both products and user products. The references associated with tyre fires are extensive and the most accessible.

Pollutant emission affecting the air, water and soils are particularly visible and remanent given that these fires, once established, are very difficult to control and extinguish in the case of mass storage. The emissions are essentially more or less heavy aromatic compounds (pyrolysis products), sulphured and metallic compounds, with a large number of condensed or condensable phases.

However, for this type of waste, the state of the art is consistent and guides enable improved hazard prevention / protection with respect to existing tyre storage facilities.

For ACR fires, the feedback is limited but exists. The divided nature of the storage facility results in self-heating phenomena with a minor, but toxic, thermal effect in the near vicinity. In addition, water and soil pollution is caused by infiltration of the pyrolysis products generated in the fire.

The environmental impact of paper and wood fires varies depending on whether the waste is compacted or not and whether it contains treating products containing potentially pollutant chemical molecules in the event of fire particularly for treated woods.

In section 2 of the final report, INERIS presents the waste storage facility fire feedback summary sheets: each sheet describes, according to the type of waste involved, the behaviour in fire of such a storage facility along with prevention and protection recommendations.

2.2. STAGE 2: INVENTORY OF THE DIFFERENT PROCESSES LIABLE TO RESULT IN A FIRE ON A WASTE STORAGE FACILITY.

Even restricted to industrial fires, the study of the origin and development of fires represents a very vast subject. Firstly, the nature of the fuel, which may be gas, liquid or solid in this type of fire, diversifies the essential characteristics. Gas combustion is by far the best known and the origin of a flame (inflammation) or its development (propagation) can be described in detail using theoretical models.

Liquid combustion has been studied for a number of years and involves, other than in exceptional cases, the establishment of a diffusion flame in which the liquid substance burns in the vapour phase. The radiation transfer determines the "states of equilibrium" established in large-scale fires.

The analysis of solid fires is more complex: in fact, a number of decomposition processes (thermal breakdown) occur even within solid phases under the effect of heat.

The quantity of heat released during a combustion process depends on the gross calorific value and the specific rate of combustion of the substance. These two parameters determine the effective heat release rate (power) of the fire, which is modulated by the yield (generally of the combustion process).

At this stage, the INERIS study records the large number of parameters (some of which are presented in table 1) that determine both the outcome of waste fires and associated pollutant emissions.

Type of waste	Combustion parameters with an influence on the fire source term
Combustible waste fire	Mass, elementary composition, size of storage facility, combustion rate, gross calorific value, combustion products, thermal power
Flammable liquid fire	Size of storage facility, combustion rate, gross calorific value, combustion products, thermal power
Flammable gas fire (a)	Combustion rate, gross calorific value, thermal power

Table 1: Combustion parameters required to characterise the source term

(a) not liable to be involved in fires.

A fire in a combustible solid product store may particularly be initiated by the application of an outside source of ignition (spark, hot spot, naked flame), or by self-heating which degenerates to a storage facility self-ignition process.

The starting of fires by solid substance self-ignition is governed by three decisive parameters that may or may not be combined:

- the characteristics of the substance (reactivity of substance, fermentable substance, substance comprising more or less oxidisable compounds, etc.),
- the geometric conditions (size, shape, S/V ratio): the critical self-ignition point is only significant if it is associated with the S/V ratio,
- the limit thermal conditions (storage temperature and period).

However, substances subject to self-heating phenomena may be stored for a limited period, at temperatures above the critical self-ignition temperature determined for the corresponding volume, i.e. over a period less than the determined induction period.

In reality, combustion reactions initiated by the self-heating phenomenon may occur with or without a flame. Flameless combustion (incandescence, smouldering fire) may then degenerate into flamed combustion depending on the nature of the substance and the local ventilation and air diffusion conditions. These fires are characterised in that they are difficult to extinguish since it is difficult to detect them at a sufficiently early stage, they develop within the storage facility and can affect large volumes of substances.

Finally, it is necessary to account for the fact that the core propagation rate of latent fires is very slow.

The equations and models presented in stage 2 of the final report represent valuable tools to study the self-heating potential of combustible solid substance storage facilities. Combined with an experimental approach, which generally remains essential to determine the basic data, these calculations make it possible to plan the self-heating behaviour of the product storage facilities meeting a wide range of geometric storage facility conditions.

Finally, within the scope of this study, INERIS examined the sources and causes of dumping ground fires, particularly due to the biogas produced in dumping grounds. However, while the biogas may be the source of a fire in a dumping ground, other combustible materials present on the site may also take fire to ignite the biogas and/or propagate the fire. A bibliographic analysis was conducted on the causes of the appearance of internal and external ignition sources in waste storage facilities.

2.3. STAGE 3: STUDY OF POLLUTANTS EMITTED DURING WASTE COMBUSTION.

It is important to note that all fires result in the emission of a wide variety of thousands of compounds.

This study, which remained relatively theoretical, was consolidated by the bibliographical analysis, which detected the main constituents emitted during waste combustion in the event of fire. The secondary constituents liable to be emitted and the specific emission conditions for these constituents were presented. In addition, for the main constituents, the parameters affecting the formation of each of these constituents were identified.

Table 3 gives the gaseous pollutants emitted in the event of a fire involving various chemicals: this is general data which is intended to underline the variety of the substances emitted according to the category of the substance stored in a qualitative manner. Naturally, it is necessary to underline the existence of particulate pollutants (soot, etc.) in addition to these gaseous pollutants.

Chemicals	Pollutants emitted
Chlorinated plastics	<ul style="list-style-type: none"> - PAH - Aliphatics, benzene and derivatives - Chlorinated aliphatics - Dioxins and furans - Heavy metals
Non-chlorinated plastics	<ul style="list-style-type: none"> - PAH, Aliphatics, benzene and derivatives - Heavy metals
Chlorinated chemicals	<ul style="list-style-type: none"> - PAH, Aliphatics, benzene and derivatives - Chlorinated aliphatics - Dioxins and furans
Non-chlorinated chemicals	<ul style="list-style-type: none"> - PAH - Aliphatics, benzene and derivatives
Organometallic pesticides	<ul style="list-style-type: none"> - Series of organic compounds - Heavy metals

Table 2: Main categories of pollutants emitted during fires involving various chemicals

The main substances concerned in a fire are carbon-containing compounds and the quantitative variations of the various combustion compounds depend on the thermal decomposition conditions, the chemical elementary analysis of the substance and the type of fire.

The main decomposition and fire propagation hazards can be classified into 3 categories:

- **smouldering fire**: this type of fire involves slow flameless thermal decompositions at low temperatures. The pyrolysis products essentially consist of carbon-containing substances (approximately 50% of the decomposed mass), which are irritants for the respiratory tract. Organic acids are also a source of irritant gases in this type of fire. Due to the slow propagation of such fires, there is rarely a mortal hazard with respect to combustion fumes in the absence of confinement, unless there are subjects asleep or with respiratory problems in the near vicinity of the fire. The main problem would be harmful respiratory effects for residents in the vicinity of the fire;

- **open fires (well-ventilated fires)**: these fires occur with excess air in open spaces (low fuel/air ratio). Under these conditions, the combustion is efficient such that the main combustion products formed are carbon dioxide, water and heat (in the case of the combustion of organic substances with a low number of hetero-atoms). In these fires, CO (minority level with respect to carbon dioxide) and CO₂ may become significant toxic substances and other inorganic substances may be emitted in the form of acid gases. Some materials (e.g. treated wood, etc.) do not burn completely and essentially produce CO and toxic gases.

- **controlled ventilation fires**: These fires occur with an air deficiency and consist of small fires in large premises. Reduced ventilation results in significant emissions of CO, CO₂, HCN, inorganic substances, fumes and inorganic acid gases.

The toxic fumes from a fire are identified in three categories:

- asphyxiating pollutants: they represent the most hazardous gases and are frequently sources of toxic emissions responsible for deaths: the most significant are NO, H₂S, SO₂, HCN, CO;
- Irritant pollutants: these consist of soot (nitrogen-containing and carbon-containing polycyclic microparticulate compounds), mineral acids and irritant organic substances. Over twenty can be identified. The most frequent inorganic acid gases in fire fumes essentially consist of HCl, HBr, HF, NO_x, SO_x, P₂O₅. Irritant organic substances represent carbon-containing compounds (formaldehyde, acrolein, butyraldehyde, acetaldehyde, etc.) and nitrogen derivatives (NO, NH₃, isocyanate, amine);
- "Specific toxicity" compounds: these carcinogenic, mutagenic, allergenic, etc. compounds are generally formed in limited quantities in the wreath of smoke and generally do not induce acute effects (with visible signs of toxicity in real time) but may have long-term toxic effects (benzene, dioxin, dibenzofuran, etc.).

Asphyxiating and irritant pollutants determine the acute toxicity hazard associated with fires and more specifically (depending on the substances emitted and the exposure time) the lethal and incapacitation hazards.

"Specific toxicity" pollutants are characterised by the absence of critical thresholds and potential effects which only appear in the long term. This statement is of course of drastic significance for the problems relating to fire fume toxicity.

Toxic compounds are produced by "standard" combustion products (produced by the majority of materials), in particular substances generated by storage facility fires.

Finally, pollution involving the carriage of contaminant substances by extinguishing water was approached: in fact, chemical fire extinguishing waters pollute (in the absence of "barriers" such as extinguishing water retention basins):

- by carrying contaminant substances (dissolved or not) to the water network (river, lake, underground water, groundwater table, sea, etc.): direct or indirect ecotoxicity;
- also due to the potential impact of certain additives (particularly surfactants) contained in the emulsifiers (all types of emulsifiers, particularly fluorinated).

2.4. STAGE 4: OVERVIEW OF THE VARIOUS POSSIBLE POLLUTANT TRANSFERS.

The transfer processes of pollutants emitted in the air by fires is a very complex phenomenon due to the upstream mechanisms governing their production (pyrolysis / combustion reactions, migration, conversion of certain pollutants inside the wreath of smoke).

To evaluate the wind distances of a fire below which effects on human health, associated with fume toxicity, may be observed, the four-stage approach presented below is of interest:

1. Characterisation of source term of fire;
2. Characterisation of acute toxicity of fire fumes by means of critical thresholds corresponding to the occurrence of a given effect on human health (1% lethality; limit of irreversible effects for health);
3. Characterisation of toxic pollutant emission source, i.e., among other things, emission height, rate and temperature of fumes released into the atmosphere;
4. Calculation of atmospheric dispersion, particularly maximum toxic gas concentration levels in soil.

The transfer processes of pollutants in soils and aquatic environments are no less complex. A guide on the behaviour of pollutants in soil and groundwater was published by Editions BRGM in 2001.

This guide mentions the various factors affecting the behaviour of pollutants in soils, particularly those controlling the transfer of pollutants to underground water resources. The behaviour of a pollutant in the soil and subsoil depends directly on its intrinsic properties. Therefore, not all the pollutants present in the event of diffuse or chronic pollution will behave in the same way.

As a general rule, the interaction between the pollutants and the environments involved (soil and subsoil) will slow down the migration of the pollutant. In addition, the impact of these pollutants on the underground environment depends on its specific local characteristics (permeability, porosity, water content, etc.), and spatial variations in these values. Therefore, the transfer of pollution will be slower or attenuated with respect to the transfer of water through the environment. This attenuation, or delay, depends both on the properties of the pollutant substances and those of the environments. These properties must be acknowledged before a transfer model is chosen.

2.5. STAGE 5: DRAFTING ON AN INVENTORY OF THE MOST SUITABLE TEST METHODS FOR THE STUDY OF THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF A WASTE STORAGE FACILITY FIRE.

The important issue of fire tests currently represents, in view of the complexity of the phenomena involved with fires, one of the fundamental tools available to the various parties involved in confined atmosphere fire safety.

It is important to note that analysis in confined atmospheres (with or without the assistance of tests) must initially account for four aspects:

- The severity of the increased thermal impact by the confinement (direction radiation, radiation, convection and conduction effects generated by the centre of the fire),
- The potential chemical and toxic impact of the fumes generated by the fire (incapacitation or lethal hazard for subjects, etc.),
- The opacity of the fumes and, in correlation, the reduction in visibility, liable to have a drastic effect on rescue operations and result in a "panic" effect in those trapped,
- The corrosiveness of the fumes liable to affect equipment operation (electrical equipment, etc.) with a delay effect of varied length.

In view of the issues raised by the general subject of this study, the tests (or groups of tests) used to qualify pollutants must provide concrete solutions for the following aspects:

1. Knowledge of the substance particularly the elementary composition, the gross calorific value, the mean moisture content. These data are characterised using well-known standardised tests which are accessible in a large number of laboratories (including those at INERIS);
2. Knowledge of the reactivity to fire of the substances (ignitability, propagation, overall phenomenology). These data can be obtained (other than in exceptional cases) using dedicated laboratory-scale fire hazard test methods (range of calorimeters such as the calorimeter cone, Tewarson calorimeter, tubular furnaces, large-scale tests);
3. Quantification of parameters required (thermal and chemical aspects) to describe a fire scenario in the form of a "source" term of air, water and soil pollution. These data can be obtained by means of useful laboratory tests (fire calorimeters), but an "adjustment" is sometimes required using large-scale tests.

In spite of undeniable progress in modelling, tests and, more generally, the experimental approach remain essential tools for satisfactory control of the fire hazard and its various components. In the case of waste (very heterogeneous by nature), the experimental approach is particularly relevant since these substances are liable to induce atypical phenomena and their characteristics are more variable than inert substances.