

ANNEXE D10 : QUANTIFICATION DE L'INTENSITE DES PHENOMENES DANGEREUX

Ce document comporte 13 pages

0	07/10/2019	Edition initiale	C. FOLLET	C. CHANSSARD
Rév.	Date	Objet	Rédaction	Vérification & Approbation

SOMMAIRE

1.	SEUILS D'EFFETS RETENUS.....	3
1.1	EFFETS THERMIQUES	3
1.2	EFFETS DE SURPRESSION	4
2.	CHOIX DES MODELES	6
2.1	CALCUL DES EFFETS DE SURPRESSION CONSECUTIFS A L'ECLATEMENT D'UNE CAPACITE.....	6
2.2	CALCUL DES EFFETS CONSECUTIFS A UNE EXPLOSION DANS UN VOLUME DISPOSANT DE SURFACES FRAGILES	6
2.3	CALCUL DES EFFETS THERMIQUES D'UN INCENDIE DE PRODUITS INFLAMMABLES DANS UN BATIMENT.....	7
2.3.1	<i>Généralités</i>	7
2.3.2	<i>Module « Liquides inflammables »</i>	8
2.3.2.1	Calcul des caractéristiques du combustible.....	9
2.3.2.1.1	Surface de combustible.....	9
2.3.2.1.2	Vitesse de combustion des combustibles	9
2.3.2.2	Calcul des caractéristiques de flamme	9
2.3.2.2.1	Hauteur de flamme	9
2.3.2.2.2	Emittance de flamme.....	10
2.3.2.3	Calcul de la puissance de l'incendie.....	11
2.3.2.4	Durée de l'incendie.....	11
2.4	CALCUL DES EFFETS THERMIQUES CONSECUTIFS A UN INCENDIE D'ENTREPOT	11

1. SEUILS D'EFFETS RETENUS

Les seuils présentés ci-dessous sont issus de l'annexe 2 de l'arrêté du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation.

1.1 EFFETS THERMIQUES

Dans le cas des expositions longues, l'approche retenue pour caractériser les effets est basée sur un flux thermique critique, flux au-delà duquel une cible exposée ressentira les effets caractéristiques.

Les valeurs retenues dans cette approche sont de 3 et 5 et 8 kW/m² respectivement pour les premiers effets irréversibles, les effets létaux et les effets létaux significatifs.

Cette approche est utilisée pour caractériser les effets d'un incendie en régime permanent, comme les feux de nappe, de solide, les jets enflammés et les incendies de stockage si la cible potentielle n'est pas en mesure de s'éloigner ou de se protéger en moins de deux minutes.

Dans le cas des expositions courtes, l'approche retenue est basée sur des doses thermiques reçues. Cette dose est obtenue par l'équation

$$E = \Phi^{4/3} \times t.$$

où Φ est le flux thermique reçu et t est le temps d'exposition à ce flux thermique.

L'effet thermique a lieu dès que E dépasse les valeurs retenues pour les effets caractéristiques.

Les valeurs de référence relatives aux seuils d'effets thermiques pour les installations classées sont décrites dans les tableaux ci-dessous pour les effets sur les structures et sur l'homme.

Effets sur les structures :

Valeurs de référence (kW/m ²)	Effets sur les structures
5	Seuil des destructions de vitres significatives
8	Seuil des effets domino et correspondant au seuil de dégâts graves sur les structures
16	Seuil d'exposition prolongée des structures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures, hors structures béton
20	Seuil de tenue du béton pendant plusieurs heures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures béton
200	Seuil de ruine du béton en quelques dizaines de minutes

Tableau 1 : Valeurs de référence pour les effets sur les structures

Effets sur l'homme :

Valeurs de référence		Effets sur l'homme
kW/m ²	[(kW/m ²) ^{4/3}].s	
3	600	Seuil des effets irréversibles délimitant la « zone des dangers significatifs pour la vie humaine »
5	1 000	Seuil des effets létaux délimitant la « zone des dangers graves pour la vie humaine » - mentionnée à l'article L515-16 du code de l'environnement
8	1 800	Seuil des effets létaux significatifs délimitant la « zone des dangers très graves pour la vie humaine » - mentionnée à l'article L515-16 du code de l'environnement

Tableau 2 : Valeurs de référence pour les effets sur l'homme

1.2 EFFETS DE SURPRESSION

Les valeurs de référence relatives aux seuils d'effets de surpression pour les installations classées sont décrites dans les tableaux ci-dessous pour les effets sur les constructions et sur l'homme.

Effets sur les structures :

Valeurs de référence (mbar)	Effets sur les structures
20	Seuil des destructions significatives de vitres
50	Seuil des dégâts légers sur les structures
140	Seuil des dégâts graves sur les structures
200	Seuil des effets domino
300	Seuil des dégâts très graves sur les structures

Tableau 3 : Valeurs de référence pour les effets sur les constructions

Effets sur l'homme :

Valeurs de référence (mbar)	Effets sur l'homme
20	Seuil des effets correspondant à la zone des effets indirects par bris de vitre sur l'homme
50	Seuil des effets irréversibles délimitant la « zone des dangers significatifs pour la vie humaine »
140	Seuil des effets létaux délimitant la « zone des dangers graves pour la vie humaine »
200	Seuil des effets létaux significatifs délimitant la « zone des dangers très graves pour la vie humaine »

Tableau 4 : Valeurs de référence pour les effets sur l'homme

Conformément à la disposition introduite dans l'arrêté du 29 septembre 2005 compte tenu des dispersions de modélisation pour les faibles surpressions, les distances d'effets correspondant aux surpressions de 20 mbar sont prises égales au double de celles calculées pour une surpression de 50 mbar.

2. CHOIX DES MODELES

2.1 CALCUL DES EFFETS DE SURPRESSION CONSECUTIFS A L'ECLATEMENT D'UNE CAPACITE

Les effets de surpression sont modélisés selon la méthode décrite dans le guide Ω15 de l'INERIS « Les éclatements de réservoirs – Phénoménologie et modélisation des effets » - Octobre 2013.

La première phase du calcul consiste à déterminer l'énergie E libérée par la détente du gaz comprimé. Celle-ci est donnée par la formule suivante :

$$E = (P_1 - P_a) \cdot \frac{V_g}{\gamma_1 - 1}$$

Avec :

- E énergie libérée par la détente du gaz comprimé, en J,
- P₁ pression absolue du gaz à la rupture, en Pa,
- P_a pression atmosphérique, en Pa,
- V_g volume du gaz dans la capacité, en m³,
- γ₁ rapport des chaleurs spécifiques du gaz (capacités calorifiques).

La loi de décroissance de la surpression aérienne en champ lointain est donnée par la courbe d'indice 10 de la méthode Multi-Energy à partir de l'énergie ainsi calculée.

2.2 CALCUL DES EFFETS CONSECUTIFS A UNE EXPLOSION DANS UN VOLUME DISPOSANT DE SURFACES FRAGILES

Le cas étudié est l'explosion dans un volume disposant de surfaces fragiles pouvant s'éventer lorsque leur pression de rupture est atteinte.

Les calculs sont réalisés avec le logiciel Winvent 3.1e, basé pour les explosions de poussières sur les normes « NFPA 68 Guide for Venting of Deflagrations 2002 Edition » et « Pressure venting of dust explosions, VDI 3673 November 2002 » et pour les explosions de gaz sur les travaux de Wolfgang Bartknecht « Explosionsschutz, Grundlagen und Anwendungen (Explosion Protection, basics and application, only in German) », 1993 /4/.

Ce logiciel permet de calculer la pression résiduelle dans le volume en tenant compte des surfaces de décharge et de leur pression de tenue, et inversement de calculer les surfaces de décharge nécessaires pour obtenir une pression résiduelle donnée.

Deux méthodes permettent de calculer les effets de l'explosion. Elles sont décrites ci-après.

La méthode multi-énergie

La méthode Multi-énergie est adaptée pour calculer des effets de pression d'une explosion en tenant compte de la surpression maximale atteinte.

Le principe de cette méthode est de définir un indice de violence de l'explosion en fonction des niveaux de surpression atteints. L'indice de violence est compris entre 1 et 10. L'indice 10 correspond à une détonation, les indices intermédiaires correspondant à des déflagrations à des vitesses de flammes d'autant plus rapides que l'indice est élevé. Vis-à-vis de ces indices il est aussi possible de dire qu'ils caractérisent la puissance avec laquelle l'énergie des gaz inflammables est consommée pour engendrer des surpressions aériennes.

La correspondance entre les indices compris entre 1 et 10 et les niveaux de surpression maximum est rappelée dans le tableau suivant.

Indice de la méthode	Surpression maximale correspondante en mbar	Indice de la méthode	Surpression maximale correspondante en mbar
1	10	6	500
2	20	7	1000
3	50	8	2000
4	100	9	5000
5	200	10	10000

Tableau 5 : Correspondance entre indices et surpressions maximales

La détermination de l'énergie de l'explosion (Formule de Brode) associée à la courbe indice 10 de la méthode multi-énergie

L'énergie libérée par l'explosion est calculée selon la formule de Brode :

$$E = (P_1 - P_a) \times V_g / (\gamma_1 - 1) \text{ en J}$$

avec :

P_1 : pression absolue du gaz à la rupture en Pa,

P_a : pression atmosphérique en Pa,

V_g : volume du gaz dans la capacité en m^3 ,

γ_1 : rapport des chaleurs spécifiques du gaz (capacités calorifiques).

en considérant le facteur $(P_1 - P_a)$ égal à la pression réduite de l'explosion calculée avec Winvent 3.1e.

La loi de décroissance de la surpression aérienne en champ lointain est donnée par la courbe d'indice 10 de la méthode Multi-Energy.

Les distances d'effet sont données par les relations :

α Distance à 300 mbar en m : $d = 0,028E^{1/3}$

α Distance à 200 mbar en m : $d = 0,032E^{1/3}$

α Distance à 140 mbar en m : $d = 0,05E^{1/3}$

α Distance à 50 mbar en m : $d = 0,11E^{1/3}$

α Distance à 20 mbar en m : $d = 0,22E^{1/3}$

Les distances d'effets majorantes seront présentées.

2.3 CALCUL DES EFFETS THERMIQUES D'UN INCENDIE DE PRODUITS INFLAMMABLES DANS UN BATIMENT

2.3.1 Généralités

La modélisation des effets thermiques d'un incendie dans le bâtiment DIND ou dans le bâtiment DIND est réalisée à partir du logiciel FLUMILOG (version 4.05 – Interface V4.0.08).

La méthode développée par le logiciel FLUMILOG permet de modéliser l'évolution de l'incendie depuis l'inflammation jusqu'à son extinction par épuisement du combustible. Elle prend en compte le rôle joué par la structure et les parois tout au long de l'incendie : d'une part lorsqu'elles peuvent limiter la puissance de l'incendie en raison d'un apport d'air réduit au niveau du foyer et d'autre part lorsqu'elles jouent le rôle d'écran thermique plus ou moins important au rayonnement avec une hauteur qui peut varier au cours du temps. Les flux thermiques sont donc calculés à chaque instant en fonction de la progression de l'incendie dans la cellule et de l'état de la couverture et des parois.

La méthode permet également de calculer les flux thermiques associés à l'incendie de plusieurs cellules dans le cas où le feu se propagerait au-delà de la cellule où l'incendie a débuté. En effet, en fonction des caractéristiques des cellules, des produits stockés et des murs séparatifs, il est possible que l'incendie généralisé à une cellule se propage aux cellules voisines. Les différentes étapes de la méthode sont présentées sur le logigramme ci-après :

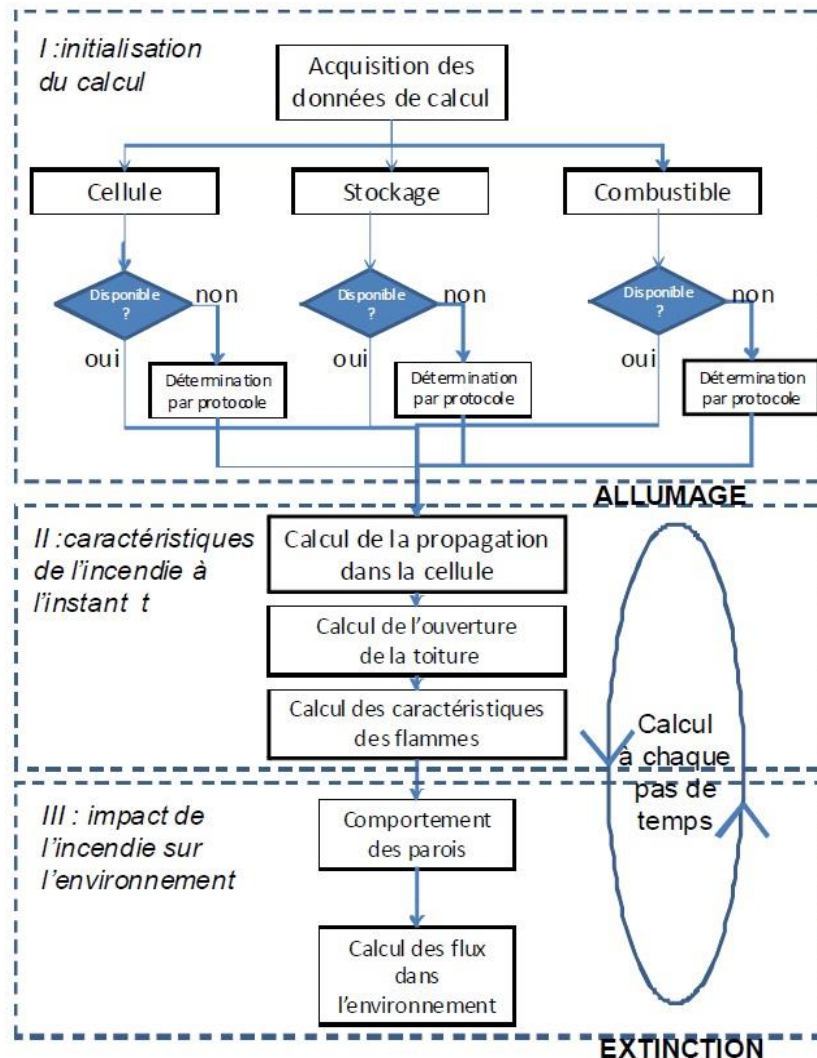


Figure 1: Etapes de calcul du logiciel FLUMILOG

2.3.2 Module « Liquides inflammables »

Pour le cas particulier d'un stockage de liquide inflammables, FLUMILOG permet désormais de calculer des incendies de cellules contenant ce type de produits, assimilés soit à des hydrocarbures, soit à des alcools, et de prendre en compte les caractéristiques des parois et merlons.

Toutefois, pour les combustibles liquides, la procédure de calcul diffère de celle utilisée pour les combustibles solides, les hypothèses considérées pour les combustibles solides résultant d'interprétations d'essais feux réels. Les flux thermiques provenant de cellules de combustibles liquides sont obtenus selon les hypothèses de la feuille de calcul du GTDLI annexée à la Circulaire DPPR/SEI2/AL-06-357 du 31/01/07 relative aux études de dangers des dépôts de liquides inflammables.

Dans la présente méthode et dans le cadre d'hypothèses pénalisantes, les liquides inflammables sont supposés brûler à pleine puissance sur une surface donnée pendant une durée forfaitaire dépendant du cas de propagation étudié, et selon certaines hypothèses de vitesse de combustion, de hauteur de flamme et d'émittance de flamme explicitées dans cette note.

Les flux thermiques calculés sont liés aux dimensions de la surface en feu (surface de la cellule) et aux produits stockés.

2.3.2.1 Calcul des caractéristiques du combustible

2.3.2.1.1 *Surface de combustible*

Pour les liquides inflammables, de manière similaire aux combustibles solides, la méthode FLUMILOG demande d'entrer la configuration de stockage (longueur de stockage, déports, dimension de racks ou d'ilots etc.). Cependant, il est important de noter que, contrairement aux feux de solides, les combustibles liquides sont supposés occuper toute la surface de la cellule au cours du calcul de sorte à obtenir un feu de nappe généralisé à l'ensemble de la surface la cellule. Ainsi, quelle que soit la configuration géométrique de stockage entrée par l'utilisateur, la nappe est supposée occuper toute la surface au sol de la cellule. Les dimensions d'ilot, de racks ou de palettes n'ont aucune influence sur les résultats. Il est à remarquer que, lorsque la longueur de la cellule est supérieure à 2,5 fois la largeur de celle-ci, alors le diamètre équivalent est pris égal à la largeur de la cellule. Toutes les grandeurs physiques présentées sont constantes dans le temps.

2.3.2.1.2 *Vitesse de combustion des combustibles*

Trois types de produits sont proposés :

- α Ethanol, dont la vitesse de combustion est forfaitairement égale à 0,025 kg/m².s,
- α Hydrocarbures, dont la vitesse de combustion est forfaitairement égale à 0,055 kg/m².s,
- α Liquides Inflammables (LI), dont la vitesse de combustion est pour le moment pris égale à celui des hydrocarbures, produit considéré comme pénalisant pour les liquides inflammables.

2.3.2.2 Calcul des caractéristiques de flamme

2.3.2.2.1 *Hauteur de flamme*

La longueur de flamme est obtenue à l'aire de la corrélation de Thomas avec prise en compte du vent selon la formule suivante :

$$L_{fla} = 55 D \left(\frac{\dot{m}''}{\rho_{air} \sqrt{gD}} \right)^{0.67} * U^s^{-0.21}$$

avec :

$$U^* = \frac{u_w}{U_c},$$

U_w étant la vitesse du vent,

et

$$U_c = \left(\frac{g n^3 D}{\rho_{air}} \right)^{1/3}$$

Conformément au GTDLI, la valeur de la vitesse du vent est fixée à 5 m/s. L'angle d'inclinaison de la flamme est également donné par la relation empirique de Thomas. La corrélation permettant de déterminer l'angle d'inclinaison Θ de la flamme est la corrélation de Welker and Sliepcevich, présentée ci-dessous :

$$\frac{\tan \Theta}{\cos \Theta} = 3,3 \times (Fr)^{0,8} \times (Re)^{0,07} \times \left(\frac{\rho_v}{\rho_{air}} \right)^{-0,6},$$

avec ρ_v la masse volumique du produit en phase vapeur à sa température d'ébullition, Fr le nombre de Froude :

$$Fr = \frac{u_w^2}{D \times g},$$

Re le nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{D \times u_w \times \rho_{air}}{\mu_{air}},$$

μ_{air} la viscosité dynamique de l'air.

Finalement, la hauteur H_{fla} de flamme est obtenue d'après la relation :

$$H_{fla} = L_{fla} \cos \Theta$$

Conformément aux hypothèses de la feuille de calcul du GTDLI, aucune limitation de hauteur n'est appliquée pour les liquides inflammables.

2.3.2.2.2 Emission de flamme

L'émission de flamme est calculée à l'aide de la corrélation de Mudan et Croce et s'exprime en kW/m² :

$$E_{moy} = 120e^{-0,12D} + 20 \text{ pour les hydrocarbures}$$

$$E_{moy} = 37,5e^{-0,15D} + 31 \text{ pour les alcools}$$

Elle est limitée en valeur inférieure à 30 kW/m².

L'émission est ensuite considérée comme homogène sur toute la hauteur de la flamme.

2.3.2.3 Calcul de la puissance de l'incendie

La puissance de l'incendie est obtenue par la formule :

$$P = \dot{m} \Delta H_c S_{\text{flamme}}$$

où ΔH_c est la chaleur de combustion prise égale à 40 MJ/kg pour les hydrocarbures et 27,8 MJ/kg pour l'éthanol, et S_{flamme} la surface de flammes égale à la surface au sol de la zone considérée en feu.

2.3.2.4 Durée de l'incendie

Lorsque la cellule de combustibles liquides est la cellule de départ de feu dans un scénario de propagation d'incendie, alors la durée de feu est forfaitairement égale à une valeur légèrement inférieure à 240 minutes. Ainsi un mur de degré REI240 restera en place durant l'incendie d'une telle cellule.

En revanche, la durée d'incendie est forfaitairement égale à une valeur légèrement inférieure à 120 minutes dans le cas d'une cellule seule, d'un stockage extérieur ou d'une cellule n'étant pas celle du départ de feu dans le cas d'un calcul de propagation d'incendie. Ainsi, un mur de degré REI120 restera en place durant l'incendie d'une telle cellule. Il est important de noter que, dans ce cas, la durée d'incendie peut s'avérer minimisée dans la méthode Flumilog par rapport à la réalité.

2.4 CALCUL DES EFFETS THERMIQUES CONSECUTIFS A UN INCENDIE D'ENTREPOT

La méthode développée par le logiciel FLUMILOG permet de modéliser l'évolution de l'incendie depuis l'inflammation jusqu'à son extinction par épuisement du combustible. Elle prend en compte le rôle joué par la structure et les parois tout au long de l'incendie : d'une part lorsqu'elles peuvent limiter la puissance de l'incendie en raison d'un apport d'air réduit au niveau du foyer et d'autre part lorsqu'elles jouent le rôle d'écran thermique plus ou moins important au rayonnement avec une hauteur qui peut varier au cours du temps. Les flux thermiques sont donc calculés à chaque instant en fonction de la progression de l'incendie dans la cellule et de l'état de la couverture et des parois.

La méthode permet également de calculer les flux thermiques associés à l'incendie de plusieurs cellules dans le cas où le feu se propagerait au-delà de la cellule où l'incendie a débuté. En effet, en fonction des caractéristiques des cellules, des produits stockés et des murs séparatifs, il est possible que l'incendie généralisé à une cellule se propage aux cellules voisines. Les différentes étapes de la méthode sont présentées sur le logigramme ci-après.

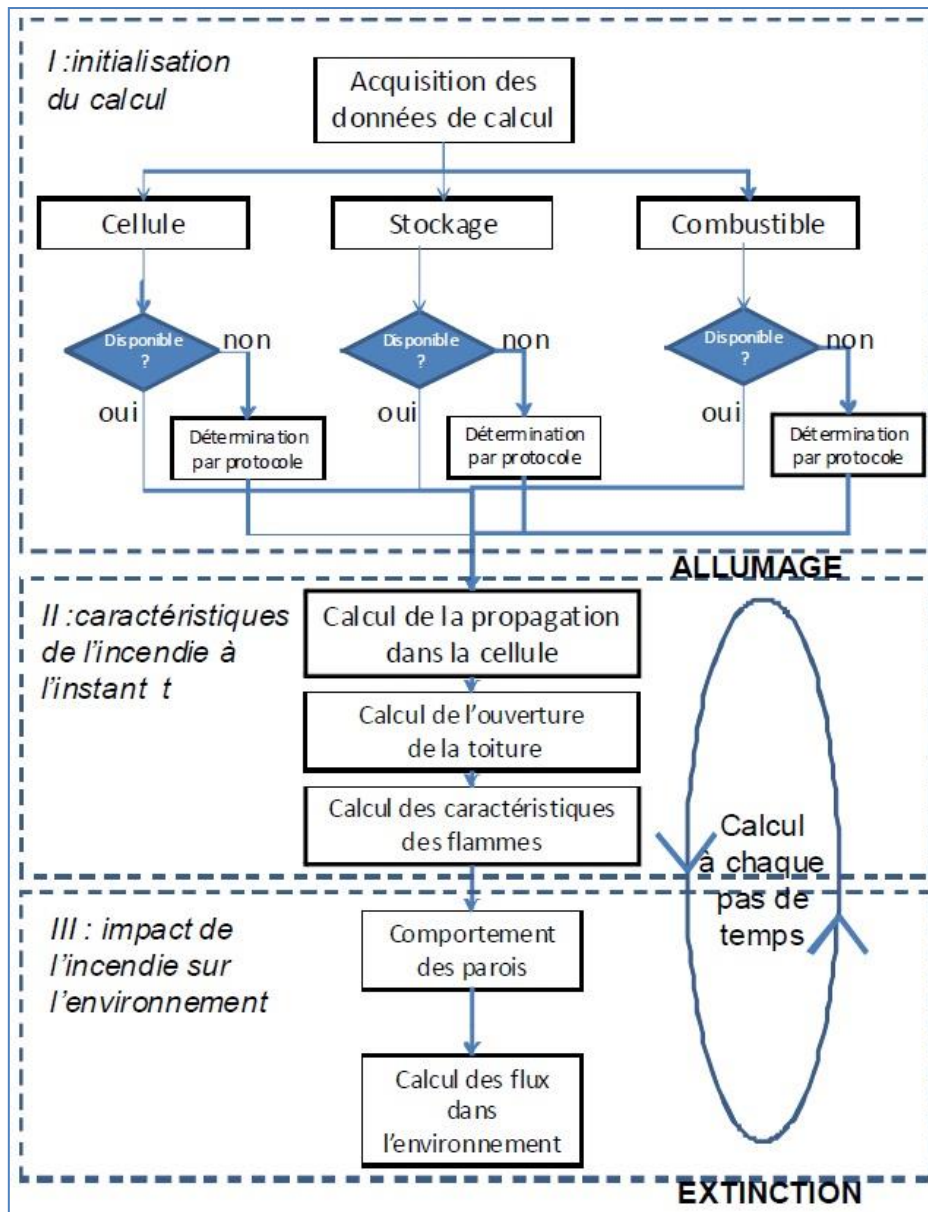


Figure 2: Etapes de calcul du logiciel FLUMILOG



24 avenue Georges Brassens - 31700 Blagnac
+ 33 (0) 5 34 36 88 22

info@alphare-fasis.fr – www.alphare-fasis.fr