

Généralités sur le terme source et la dispersion atmosphérique

Logiciel PHAST de DNV

SOMMAIRE

1	Généralités	3
2	Modèle de calcul – limites de validité	4
3	Le terme source	6
3.1	Généralités	6
3.2	Les rejets CONTINUS	7
3.2.1	Fuite sur une paroi de réservoir	7
3.2.2	Rupture totale d'une canalisation courte.....	8
3.2.3	Fuite à partir d'une canalisation longue.....	8
3.3	Les rejets INSTANTANES	9
3.4	Définition du terme source	10
3.4.1	Leak.....	10
3.4.2	Line rupture, disc rupture, relief valve.....	11
3.5	Prise en compte des différentes contributions d'un rejet.....	12
4	Étude de la dispersion	15
4.1	Conditions météorologiques	17
4.2	Prise en compte du contexte environnemental	18
4.3	Les concentrations	18

1

Généralités

Lors d'une fuite ou de la rupture d'un contenant ou d'une canalisation, un ensemble de particules, gaz, aérosols, est rejeté ponctuellement à l'atmosphère. Ces particules peuvent être toxiques ou explosives, voire les deux à la fois.

Il est donc nécessaire d'évaluer les conséquences d'un tel accident sur l'environnement (toxicité des particules, dispersion, risque d'explosion confinée ou non et impact sur l'homme).

La dispersion dépend de plusieurs paramètres :

- les conditions du rejet et en particulier l'état physique des produits concernés (gaz sous pression ou non, liquide, gaz liquéfié),
- la réactivité avec l'atmosphère (produits inertes, stables ou réactifs primaires...),
- rejets particuliers (poussières...)¹
- le mode d'émission (rejet instantané ou continu)
- les conditions météorologiques,
- l'environnement (nature du sol, présence d'obstacle...)

L'étude de dispersion atmosphérique se déroule en trois étapes :

- 1. Définition du terme source,**
- 2. Modélisation de la dispersion atmosphérique du panache,**
- 3. Analyse des concentrations de :**
 - **toxicité en comparant les résultats aux seuils de toxicité en situation accidentelle,**
 - **d'explosivité ou d'inflammabilité pour étudier les risques d'explosions en champs libres ou confinés.**

¹ Les particules de rayon < à 5µm se comportent comme des gaz

Modèle de calcul – limites de validité

Le logiciel utilisé pour modéliser la dispersion atmosphérique est le logiciel PHAST développé par Det Norske Veritas (DNV).

Le logiciel utilisé pour cette étude, **PHAST (version 6.7)**, comporte un module de dispersion atmosphérique appelé « UDM » pour Unified Dispersion Model. Cet outil numérique est largement utilisé et reconnu sur le territoire, en Europe et dans le monde entier. Il se base en effet sur les technologies et les connaissances les plus récentes dans le domaine. Parmi les utilisateurs français, on compte des instituts et organismes nationaux, des industriels, ainsi que de nombreux bureaux d'études.

Le modèle « UDM » de PHAST est un modèle intégral qui permet de prendre en compte les mécanismes physiques des fluides tels que :

- la turbulence dynamique lors de rejet sous forme de jet,
- les effets de gravité pour les gaz lourds,
- les effets de flottabilité pour les gaz légers.

Le modèle permet principalement :

- pour les rejets instantanés, de suivre le nuage dans son ensemble depuis le rejet turbulent jusqu'à sa phase passive. Il donne la position et les propriétés du nuage à différents instants,
- pour les rejets continus, de suivre un panache développé dans lequel le produit est encore en train d'être rejeté.

Les calculs de dispersion commencent après l'expansion du nuage et lorsque les gaz sont à pression atmosphérique et avant la dilution du nuage avec de l'air. Le modèle intégral utilise un modèle gaussien pour calculer la trajectoire et la dilution du panache dans sa phase passive.

Le terrain est supposé plat et homogène. Néanmoins, les caractéristiques du terrain peuvent être prises en compte sous la forme d'un seul paramètre, la rugosité, qui traduit la présence d'« obstacles » susceptibles de perturber la dispersion des polluants et de favoriser l'effet d'accumulation et la concentration.

Les simulations reposent en grande partie sur les conditions météorologiques. Ces données météorologiques nous renseignent bien sûr sur le vent (vitesse et direction), mais permettent également de caractériser la structure verticale de l'atmosphère (stabilité, vent ascendant, turbulence, inversion de température...) qui conditionne la dispersion des polluants. Dans ce cadre, l'utilisation des classes de Pasquill permet d'envisager un large panel de conditions atmosphériques.

PHAST permet également à travers un module « Discharge modelling » de déterminer le terme source du rejet en fonction des conditions de stockage et du type de rejets (rupture de canalisation, fuite, évaporation de flaque, ruine de contenant...).

Le modèle UDM a été largement étudié par l'INERIS qui a conclu à la bonne représentativité des résultats obtenus avec le modèle (voir document DRA-2002-29576-Sdu/Jco/Ebe).

	Avantages	Inconvénients
Modèle intégral	<ul style="list-style-type: none"> - prise en compte de gaz lourd et de gaz léger - quantification du terme source - modèle calé sur des expériences - champ lointain entre 20 m et 10 km 	<ul style="list-style-type: none"> - pas d'obstacles, ni de relief - pas de conditions météorologiques extrêmes - erreurs dues à la simplification d'équations de la mécanique des fluides

3

Le terme source

3.1 Généralités

En amont de la modélisation de la dispersion, il convient de quantifier le terme source, c'est à dire caractériser la source d'émission initiale et qui conditionne la formation du nuage ou du rejet. Le terme source se caractérise par :

- la nature du produit et son état physique (liquide, gaz),
- la quantité rejetée,
- les conditions du rejet (pression, température, débit, vitesse...),
- la nature du phénomène initiateur (rupture guillotine, fuite, brèche...).

Le terme source en fonction des scénarios et des phénomènes étudiés peut se déterminer forfaitairement ou à l'aide du logiciel PHAST à travers son module « Discharge modelling ».

La source d'émission peut être classée en deux grandes catégories :

1. rejet continu (par exemple vidange de réservoir sous pression pendant une heure).
2. rejet instantané (par exemple un éclatement du réservoir).

Caractériser un terme source consiste donc à évaluer :

- la **masse totale** de substance dangereuse libérée pour les rejets instantanés ou le **débit massique** (et son évolution dans le temps) pour les rejets continus ;
- la **vitesse finale** de la substance dangereuse rejetée (gouttes de liquide, molécules de gaz) ;
- la **température du rejet** : globalement, cette grandeur permet d'accéder à la densité du nuage par rapport à l'air ambiant. La densité joue un rôle sur le déplacement vertical du nuage et donc sur sa dilution ;
- la valeur de **fraction liquide** dans le rejet et la **répartition granulométrique de la fraction liquide** du rejet : ces grandeurs permettent également d'accéder à la densité du rejet et d'en prévoir son évolution (évolution de température, de taille, possibilité de flaque au sol, ...).

3.2 Les rejets CONTINUS

Pour les rejets en continu, les paramètres les plus importants sont :

1. le diamètre de la fuite ou le débit massique,
2. la durée de la fuite,
3. les conditions de stockage (pression, température),
4. la hauteur et la direction du rejet.

3.2.1 Fuite sur une paroi de réservoir

Ce terme source (scénario PHAST : Leak) correspond à une brèche sur la paroi d'un réservoir ou à un petit trou sur une canalisation de grand diamètre qui se comporte alors comme un réservoir (Figure I.2).

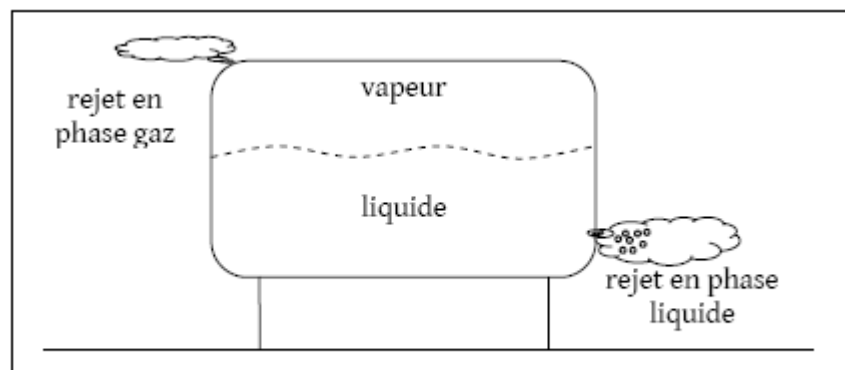


Figure I.2 Fuite sur une paroi de réservoir

Dans un stockage biphasique, la nature de la phase du produit rejeté dépend de la position de la brèche (Figure I.2).

Dans le cas où la brèche se situe au dessous du niveau du liquide dans le réservoir, la phase de rejet liquide peut « flasher » pendant l'expansion à pression ambiante.

3.2.2 Rupture totale d'une canalisation courte

La rupture guillotine (scénario PHAST : Line rupture) d'une canalisation courte sur un réservoir peut entraîner un changement de phase du produit dans la canalisation avant qu'il soit rejeté dans l'atmosphère. La phase du produit rejeté dépend de la position de la canalisation sur le réservoir, comme le montre la Figure I.3.

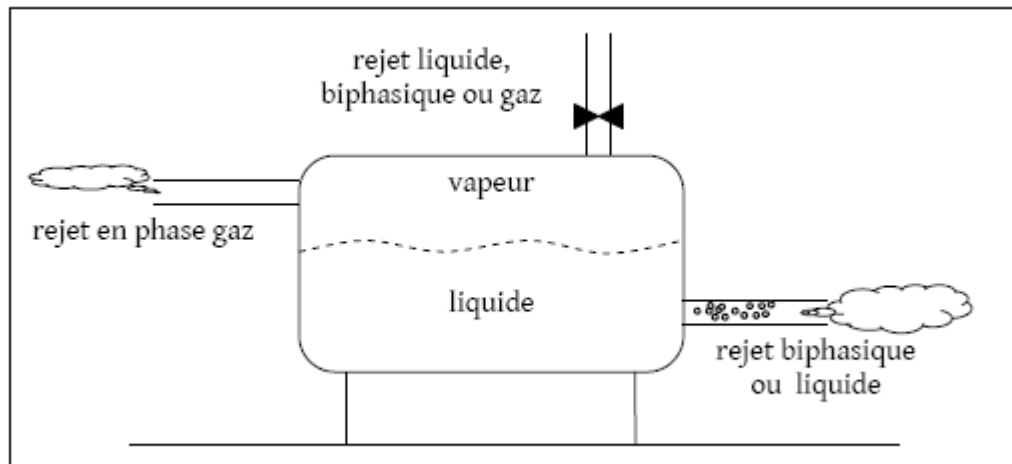


Figure I.3 Rupture totale d'une canalisation courte

Si le produit est un liquide volatil, il peut flasher dans la canalisation. Ce changement de phase est calculé avec les lois de la thermodynamique. Si la longueur de la canalisation est très importante par rapport au diamètre (par exemple, longueur supérieure à 300 fois le diamètre), alors le phénomène d'écoulement dans la canalisation devient plus complexe (scénario PHAST : long pipeline).

3.2.3 Fuite à partir d'une canalisation longue

Ce terme source (scénario PHAST : Long pipeline) concerne les rejets biphasiques ou gazeux issus d'une ouverture totale ou partielle sur une canalisation longue, dont le débit varie en fonction du temps.

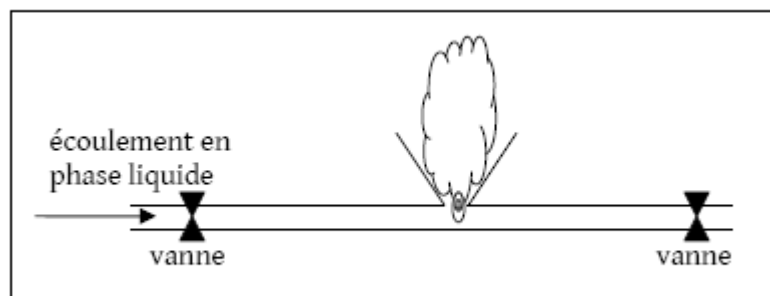


Figure I.4 Rupture sur une canalisation longue

Le calcul doit prendre en compte les caractéristiques de la canalisation et du produit en amont et en aval de la brèche. Il faut par exemple tenir compte de la fermeture automatique des vannes situées en amont ou en aval de la brèche, ce qui conditionne la masse totale de produit rejeté (Figure I.4).

La modélisation de ce terme source est plus complexe que le modèle simple utilisé pour une canalisation courte.

3.3 Les rejets INSTANTANES

Pour les rejets instantanés, les paramètres les plus importants sont :

1. la quantité totale de produits rejetée,
2. les conditions de stockage (pression, température),
3. la prise en compte des débits du rejet amont et aval.

La ruine, encore appelée rupture catastrophique (scénario PHAST : Catastrophic rupture), consiste en la rupture totale du confinement entraînant un relâchement immédiat et instantané de la totalité du contenu (Figure I.5).

Les rejets de type instantané sont principalement caractérisés par la quantité émise dans l'atmosphère et la pression de la capacité au moment de la rupture. Cette dernière peut être différente dans certains cas de la pression de stockage.

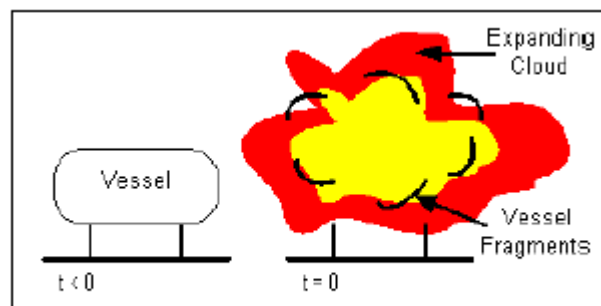


Figure I.5 Rupture catastrophique d'un réservoir

Lors d'un rejet instantané de gaz, en l'absence d'obstacle de taille significative à proximité, l'expansion initiale du nuage est relativement isotrope. Il en résulte un volume gazeux sphérique, ou semi-sphérique si l'émission a lieu au niveau du sol. Dans un cas de rejet en phase liquide, il peut se former une flaque.

3.4 Définition du terme source

Il existe plusieurs modèles dans PHAST pour calculer les divers termes sources. Le calcul du terme source est composé de deux parties :

1. la première partie du calcul est spécifique pour chaque terme source, elle définit les conditions de rejet jusqu'à l'orifice (pour « Leak ») ou jusqu'à la brèche sur la canalisation (pour « Short pipe » et « Long pipeline »).
2. la deuxième partie du calcul est effectuée avec le modèle d'ATEX (ATmospheric EXpansion model) qui détermine les conditions finales de rejet après l'expansion jusqu'à la pression atmosphérique.

Les principaux modèles de terme source de PHAST pour le mode d'émission continue sont présentés ci-dessous :

3.4.1 Leak

Ce terme source est illustré sur la Figure I.2.

PHAST utilise le modèle d'orifice pour calculer les conditions de rejet à l'orifice puis le modèle ATEX (ATmospheric Expansion) pour le calcul des conditions finales de rejet, comme cela est illustré sur la Figure I.6. Il est basé sur les équations de conservation de l'énergie et de l'entropie.

Le calcul du débit de rejet de produit est effectué en faisant l'hypothèse qu'il n'y a pas de perte de charge pendant l'écoulement du produit dans le réservoir jusqu'à l'ouverture. Ce modèle utilise le coefficient de décharge, C_D , qui est soit automatiquement choisi par PHAST (varie entre 0,6 et 1 et dépend de la phase du produit rejeté), soit défini par l'utilisateur.

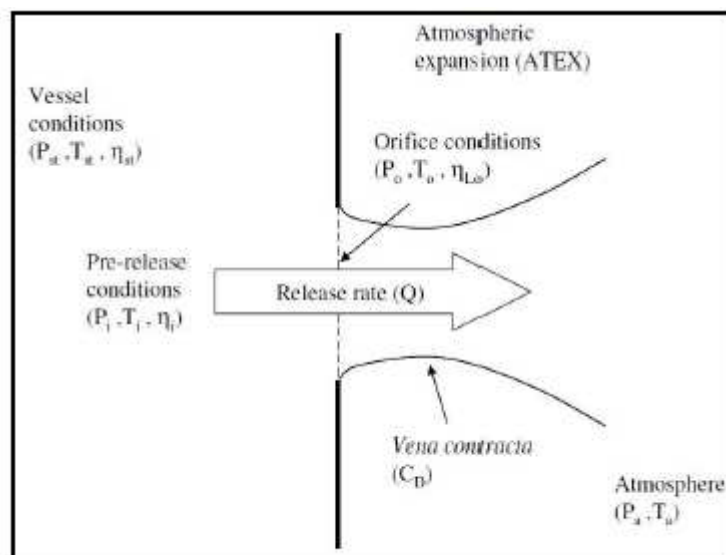


Figure I.6 Modèle d'orifice pour le terme source « Leak »

3.4.2 Line rupture, disc rupture, relief valve

Ces trois termes sources utilisent le modèle de calcul, appelé (scénario PHAST : Short pipe) (Figure I.7). Le scénario PHAST : Line rupture considère la rupture totale d'une canalisation relativement courte.

En outre, PHAST recommande d'utiliser le terme source (scénario PHAST : Long pipeline) dans les cas où la longueur de la canalisation est importante (rapport entre la longueur et le diamètre très supérieur à 300) ou pour modéliser une rupture partielle de canalisation.

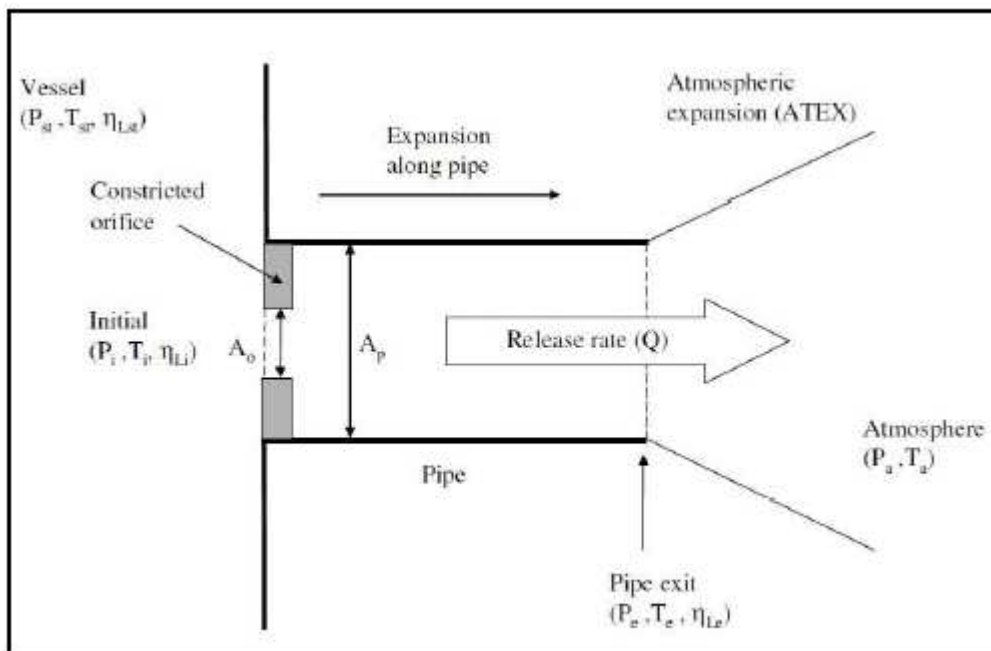


Figure I.7 Modèle « Short pipe »

Dans le cas de rejet à partir d'une vanne de détente (scénario PHAST : Relief valve) ou d'un disque de rupture (scénario PHAST : Disc rupture), la canalisation courte est représentée par la conduite d'évent. Ce modèle est basé sur les hypothèses suivantes :

- les conditions (pression, température et fraction liquide) à l'entrée de la canalisation sont égales aux conditions dans le réservoir ;
- conservation de la masse pendant l'écoulement dans la canalisation (la vitesse d'entrée est nulle) ;
- conservation de l'énergie (pas de transfert thermique à partir de la paroi) ;
- conservation de la quantité de mouvement ;
- le diamètre de la canalisation est constant.

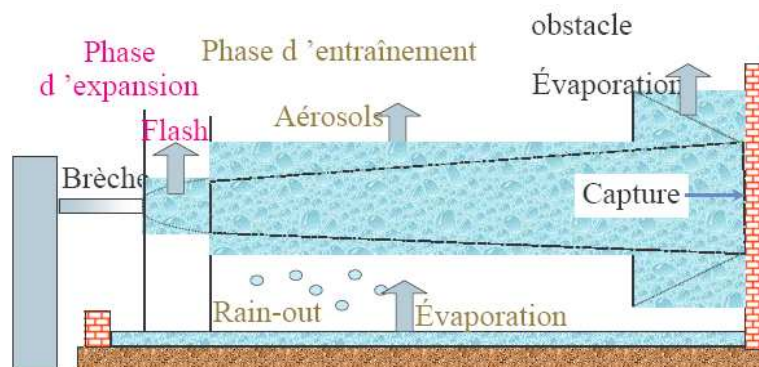
Le calcul du terme source est effectué en prenant en compte les pertes de charge liées à la canalisation, aux coudes, aux couplages, aux intersections et aux vannes.

3.5 Prise en compte des différentes contributions d'un rejet

Dans le cas des rejets de produits toxiques à l'atmosphère, l'évaluation des conséquences en termes de dose toxique est directement reliée à la durée d'exposition des personnes, et donc à la durée du rejet gazeux. Il est donc nécessaire de prendre en compte tous les phénomènes conduisant à l'émission de gaz, qui sont, de façon exhaustive :

- émission directe de gaz depuis une capacité contenant du gaz ;
- phénomène de flash, conduisant à la vaporisation instantanée d'une partie d'un rejet liquide sous pression ;
- vaporisation d'une partie des gouttelettes d'aérosols au sein d'un rejet liquide ;
- évaporation d'une nappe répandue au sol.

Le logiciel PHAST prend en compte tous ces phénomènes comme base de la modélisation de la dispersion atmosphérique.



Exemple de terme source pour un rejet continu

Dans le cas de contributions multiples au rejet de produit (par exemple lors d'une rupture guillotine avec contribution amont et aval au rejet), il est nécessaire de superposer les chronologies des différents rejets et d'analyser les contributions simultanées à chaque instant.

Dans le cas d'une double rupture guillotine, afin de pouvoir évaluer la dispersion globale et la masse globale de gaz relâchée, les contributions de chacun des écoulements sont combinées afin d'obtenir les données globales moyennes qui serviront d'entrée au modèle de dispersion. Il est supposé pour cela que les deux rejets sont orientés dans la même direction. Les équations de conservation de la masse totale de fluide, de la fraction de liquide et de la quantité de mouvement, sont écrites en tenant compte de chacune des contributions.

Une manière de déterminer les caractéristiques du rejet équivalent correspondant à la combinaison des contributions amont et aval de la brèche est décrite ci-après. Il est à noter que cette méthode constitue une simplification des phénomènes physiques.

Les fuites amont et aval de la brèche sont caractérisées par les valeurs suivantes :

		Amont	Aval
Débit	[kg/s]	Q_a	Q_b
Vitesse finale	[m/s] ¹	V_a	V_b
Fraction liquide	-	f_a	f_b
Diamètre des gouttes	[mm]	d_a	d_b
Durée	[s]	t_a	t_b

Tableau 1 : Grandeurs caractéristiques d'une fuite en amont et en aval de la brèche

La fuite totale prend en compte les contributions amont et aval. Les caractéristiques de ce rejet sont calculées à partir des règles suivantes :

- Calcul du débit total :

$$Q_t = Q_a + Q_b$$

Equation 1

Q_a : débit de produit issu de la contribution amont ;

Q_b : débit de produit issu de la contribution aval ;

Q_t : débit de produit total.

- Calcul de la vitesse totale :

$$V_t = \frac{Q_a v_a + Q_b v_b}{Q_a + Q_b}$$

Equation 2

v_a : vitesse du produit issu de la contribution amont ;

v_b : vitesse du produit issu de la contribution aval ;

v_t : vitesse totale du produit.

- Calcul de la fraction liquide totale :

$$f_t = \frac{Q_a f_a + Q_b f_b}{Q_a + Q_b} \quad \text{Equation 3}$$

f_a : fraction liquide du produit issu de la contribution amont ;

f_b : fraction liquide du produit issu de la contribution aval ;

f_t : fraction liquide totale du produit.

- Calcul du diamètre total des gouttes :

$$d_t = \frac{Q_a f_a + Q_b f_b}{\frac{Q_a f_a}{d_a} + \frac{Q_b f_b}{d_b}} \quad \text{Equation 4}$$

d_a : diamètre des gouttes du produit issu de la contribution amont ;

d_b : diamètre des gouttes du produit issu de la contribution aval ;

d_t : diamètre total des gouttes du produit.

De façon à tenir compte de l'évolution des caractéristiques du rejet au cours du temps, plusieurs périodes sont considérées, caractérisées par les valeurs maximales de débit, de vitesse, de fraction liquide et de diamètre des gouttes :

		Période 1	Période 2	...	Période n
Débit	[kg/s]	Q_{t1max}	Q_{t2max}	...	Q_{tnmax}
Vitesse finale	[m/s]	V_{t1max}	V_{t2max}	...	V_{tnmax}
Fraction liquide	-	f_{t1max}	f_{t2max}	...	f_{tnmax}
Diamètre des gouttes	[mm]	d_{t1max}	d_{t2max}	...	d_{tnmax}
Durée	[s]	t_{t1}	t_{t2}	...	t_{tn}

Tableau 2 : Grandeurs caractéristiques de l'évolution d'une fuite au cours du temps

Étude de la dispersion

La dispersion de particules (gaz, aérosols...) dans l'atmosphère dépend principalement des caractéristiques d'émission (le terme source), des conditions météorologiques et orographiques, en particulier des turbulences de l'atmosphère et de la vitesse du vent.

Le profil de concentration dans une section du nuage n'est pas uniforme et change au cours du temps. En général le profil de concentration varie dans les premiers instants de la dispersion pour suivre des variations moins marquées au fur et à mesure des phénomènes de dilution. Le profil de concentration tend vers une forme gaussienne lorsque la dispersion devient passive c'est à dire quand elle est contrôlée par la turbulence atmosphérique.

Figure 1 : Dispersion d'un rejet sans toucher le sol

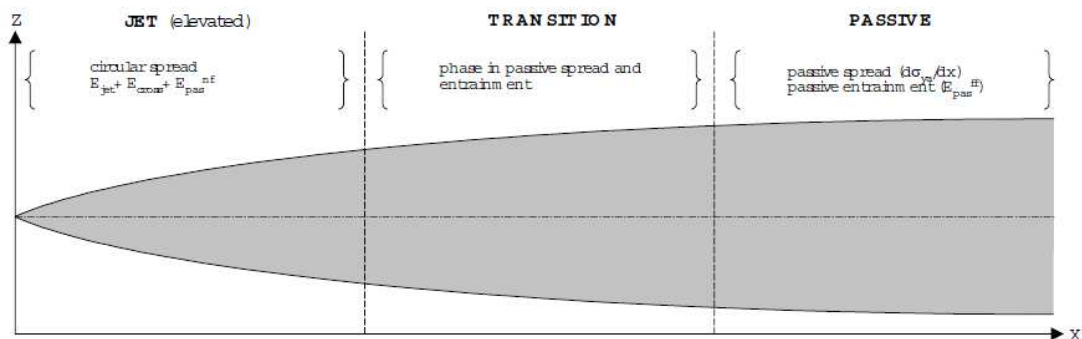


Figure 2 : Dispersion d'un rejet – contact partiel avec le sol

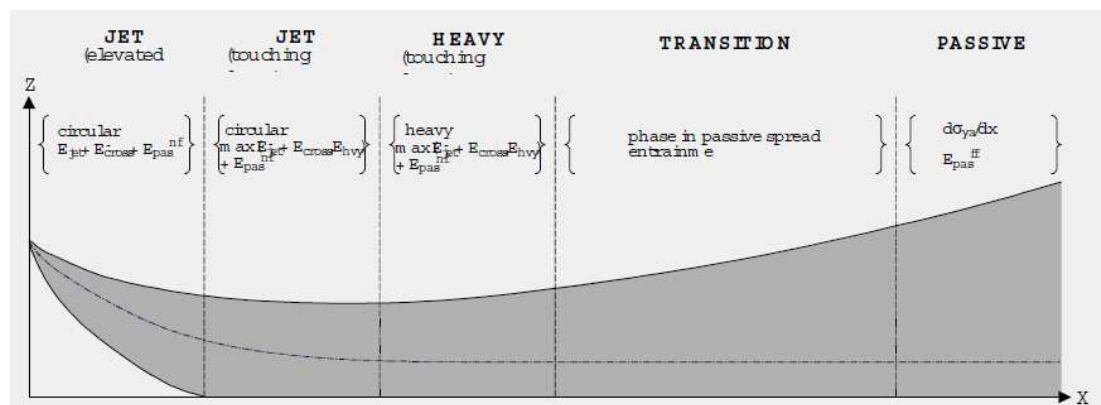


Figure 3 : Dispersion d'un rejet – contact total avec le sol

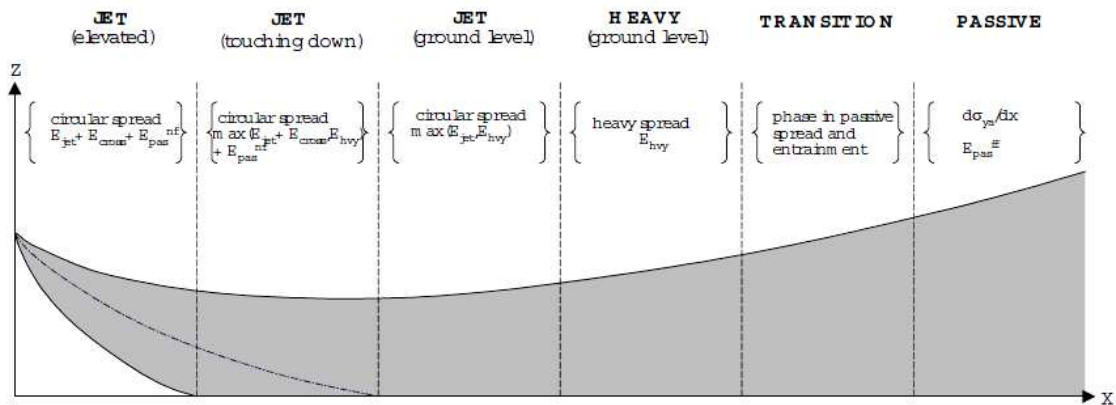


Figure 4 : Dispersion d'un rejet – élévation du nuage

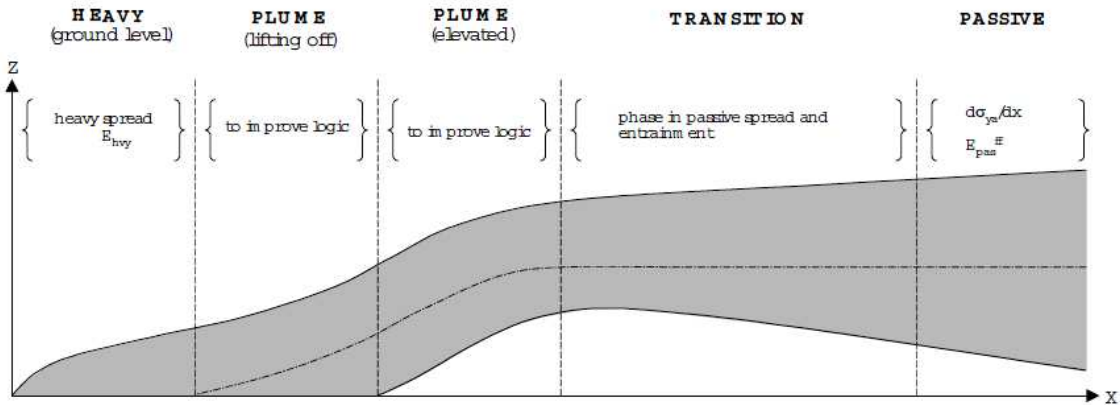
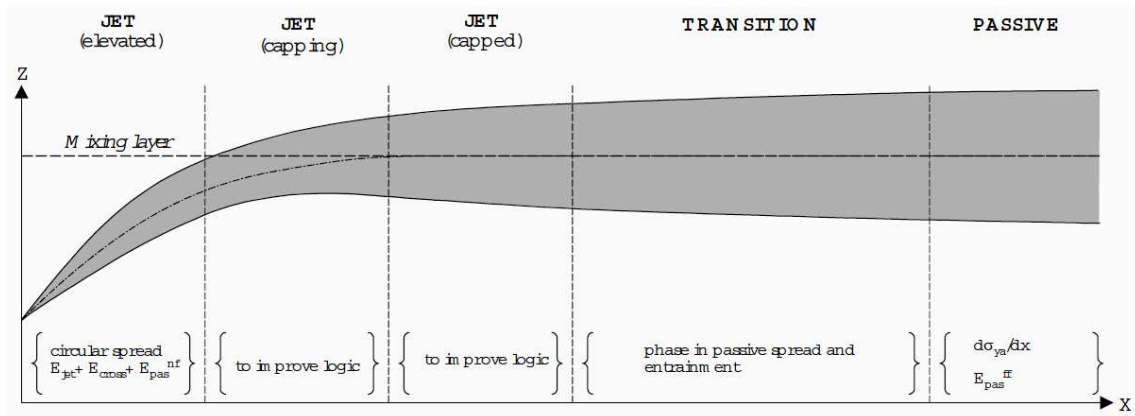


Figure 5 : Dispersion d'un panache



4.1 Conditions météorologiques

La connaissance des paramètres météorologiques est primordiale pour l'étude de la dispersion des rejets industriels dans l'atmosphère. Les données telles que la direction et la vitesse du vent, la couche d'inversion de température et la température de l'air sont des grandeurs physiques qui permettent de caractériser l'état de l'atmosphère, mais elles ne sont pas suffisantes. D'autres variables comme le rayonnement solaire, les flux de chaleur et la nébulosité (ou couverture nuageuse) sont nécessaires pour bien représenter la climatologie locale, en particulier les mouvements d'air dans les premières couches de l'atmosphère.

Afin de prendre en compte l'ensemble des conditions climatiques susceptibles d'être rencontrées, on modélise la dispersion de fumées dans différentes conditions : les classes de stabilité de Pasquill.

Les classes de stabilité, selon Pasquill, reflètent l'aptitude de l'atmosphère à disperser verticalement les polluants. Elles sont classées de A à F :

- la classe de stabilité A correspond à une atmosphère très instable c'est-à-dire à une bonne dispersion verticale des polluants,
- au contraire, la classe de stabilité F correspond à une atmosphère particulièrement stable c'est à dire une faible dispersion verticale des polluants.

Figure 6 : Exemple de dispersion d'un panache en fonction des données météorologiques

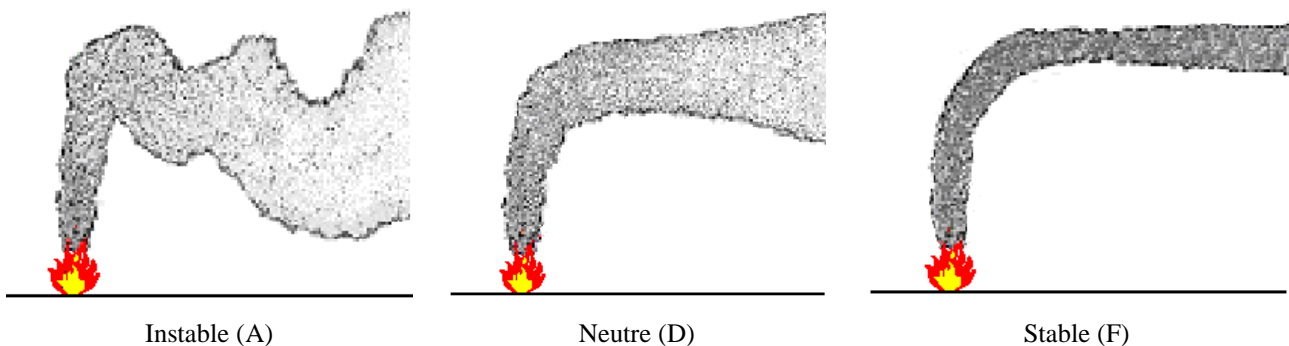


Figure 7 : Classes de stabilité en fonction des conditions atmosphériques

Vitesse du vent u (m/s)	Jour			Nuit	
	Rayonnement solaire incident			Modérément couverte	Claire
Mesuré à 10 m de hauteur	Fort	Modéré	Faible	Nébulosité	Nébulosité
	Par temps clair, nébulosité < 3/8			Entre 4/8 et 7/8	< 4/8
	$S > 60^\circ$	$35^\circ < S < 60^\circ$	$S < 35^\circ$		
$u < 2$	A	A - B	B	F	F
$2 < u < 3$	A - B	B	C	E	F
$3 < u < 5$	B	B - C	C	D	E
$5 < u < 6$	C	C - D	D	D	D
$u > 6$	C	D	D	D	D

- S : hauteur du soleil dans le ciel.
- La classe D s'applique aux ciels couverts – aussi bien de jour que de nuit – quelque soit la vitesse du vent.

4.2 Prise en compte du contexte environnemental

Les conditions orographiques du terrain sont prises en compte. La nature des sols et la présence d'obstacles se traduisent à travers un seul paramètre, la rugosité, qui est homogène sur le domaine d'étude. Représentant la nature rugueuse des obstacles occupant le sol, il a les dimensions d'une longueur variant entre 0 (surface complètement lisse) et environ 3 mètres pour les sols urbains les plus denses.

Exemple, une rugosité de 0,7 mètre, correspondant à une rugosité moyenne par rapport aux types de sol rencontrés sur l'aire d'étude : zone mixte : dégagée et bâtie.

4.3 Les concentrations

Le calcul de la dispersion permet d'obtenir les distances maximales atteintes par le nuage à une concentration donnée, les masses de gaz inflammables contenues dans le nuage, et la forme du nuage (grâce au sideview sous PHAST).

Les concentrations de polluants obtenues via la modélisation sont comparées :

- soit aux seuils des effets réversibles, irréversibles et létaux donnés par la réglementation afin de conclure sur la toxicité du rejet,
- soit aux LIE et LES afin de conclure sur les risques d'explosion en champ libre ou confiné.