



# Prévention du risque Inondation dans les ICPE

**Journée d'information**  
**28 mai 2019**

Thomas MARCON  
Direction des Risques Accidentels, INERIS  
[Thomas.marcon@ineris.fr](mailto:Thomas.marcon@ineris.fr)

1. Accidentologie et conséquences des inondations de sites industriels
  - Retour sur quelques accidents industriels
  - Base de données ARIA du BARPI
  
2. Démarche de maîtrise du risque inondation dans les ICPE
  - Caractérisation du risque inondation
  - Identification des séquences accidentelles
  - Stratégie à envisager

# 1. Accidentologie et conséquences des inondations de sites industriels

Accidents industriels, provoqués par une inondation et ayant engendré des effets à l'extérieur du site :

1. Incendie d'une usine de fabrication de poudre de magnésium (1955)
2. Incendie et explosions dans une raffinerie (2002)
3. Rejet accidentel de chlore dans un complexe chimique (2002)
4. Rejet d'hydrocarbures dans une raffinerie (2007)
5. Explosions et incendie de peroxydes organiques sur un site chimique (2017)

- Incendie d'une usine de fabrication de poudre de magnésium (1955)

Deux ouragans à 5 jours d'intervalle :

⇒ Précipitations intenses

⇒ Rupture de barrages au fil de l'eau

⇒ Niveau de la rivière : **8 m** au-dessus de son niveau normal





- Incendie d'une usine de fabrication de poudre de magnésium (1955)

Choc thermique au niveau des fours

⇒ Perte d'intégrité

⇒ Réaction eau-métal en fusion

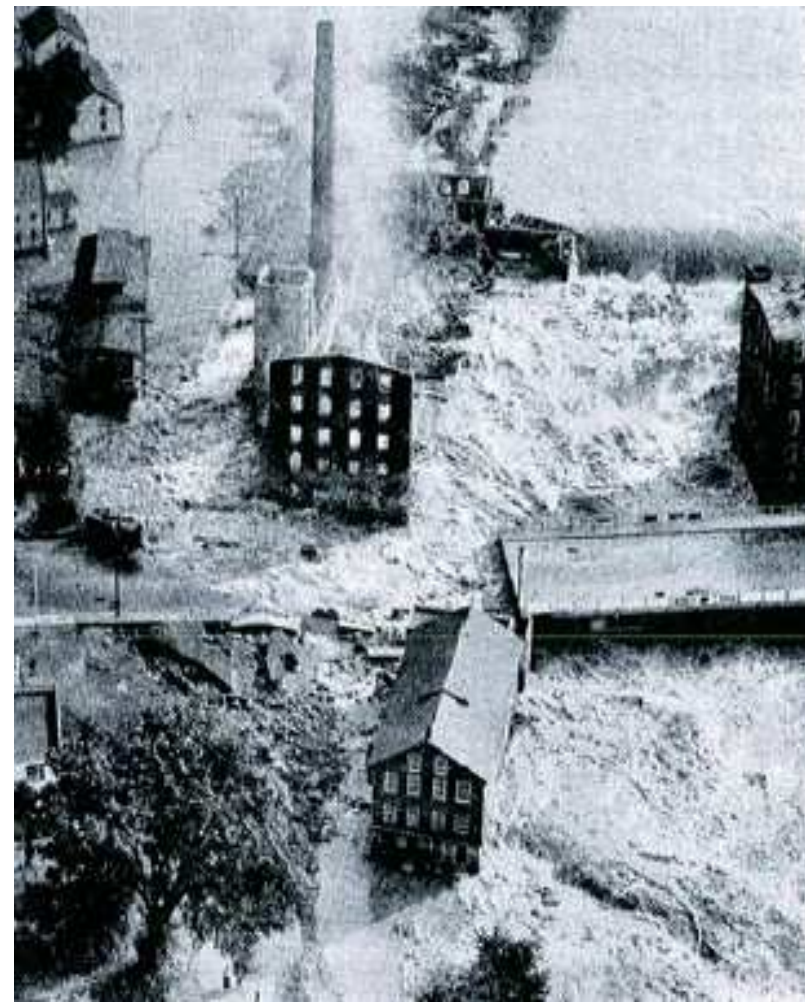
⇒ Incendie / explosion

Transport de fûts de magnésium dans l'écoulement

⇒ Réaction pyrophorique de la poudre de magnésium, avec génération de  $H_2$

⇒ Explosion et projection de métal en fusion en pleine ville

⇒ Propagation d'incendies



Paralysie des moyens  
d'intervention

- Incendie et explosions dans une raffinerie (2002)

Débordement d'un oued en zone littorale :

⇒ Précipitations intenses

⇒ Barrage de protection inefficace

⇒ Jusqu'à **1,5 m d'eau** dans la raffinerie :

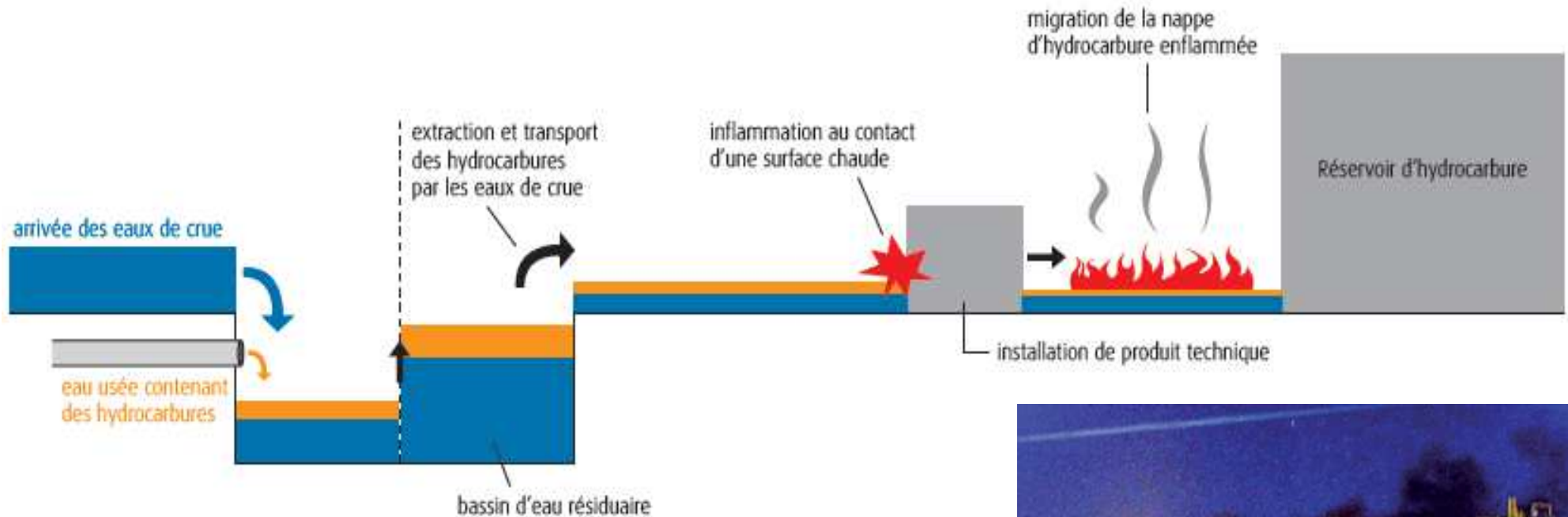


- 1 Zones de process industriel
- 2 Zones de stockage
- 3 Sphères de GPL

- 4 Bâtiments administratifs
- 5 Station de traitement des eaux
- 6 Centrale de production d'énergie

# Accidentologie et conséquences des inondations de sites industriels

- Incendie et explosions dans une raffinerie (2002)



Paralysie des moyens d'intervention



- Rejet accidentel de chlore dans un complexe chimique (2002)

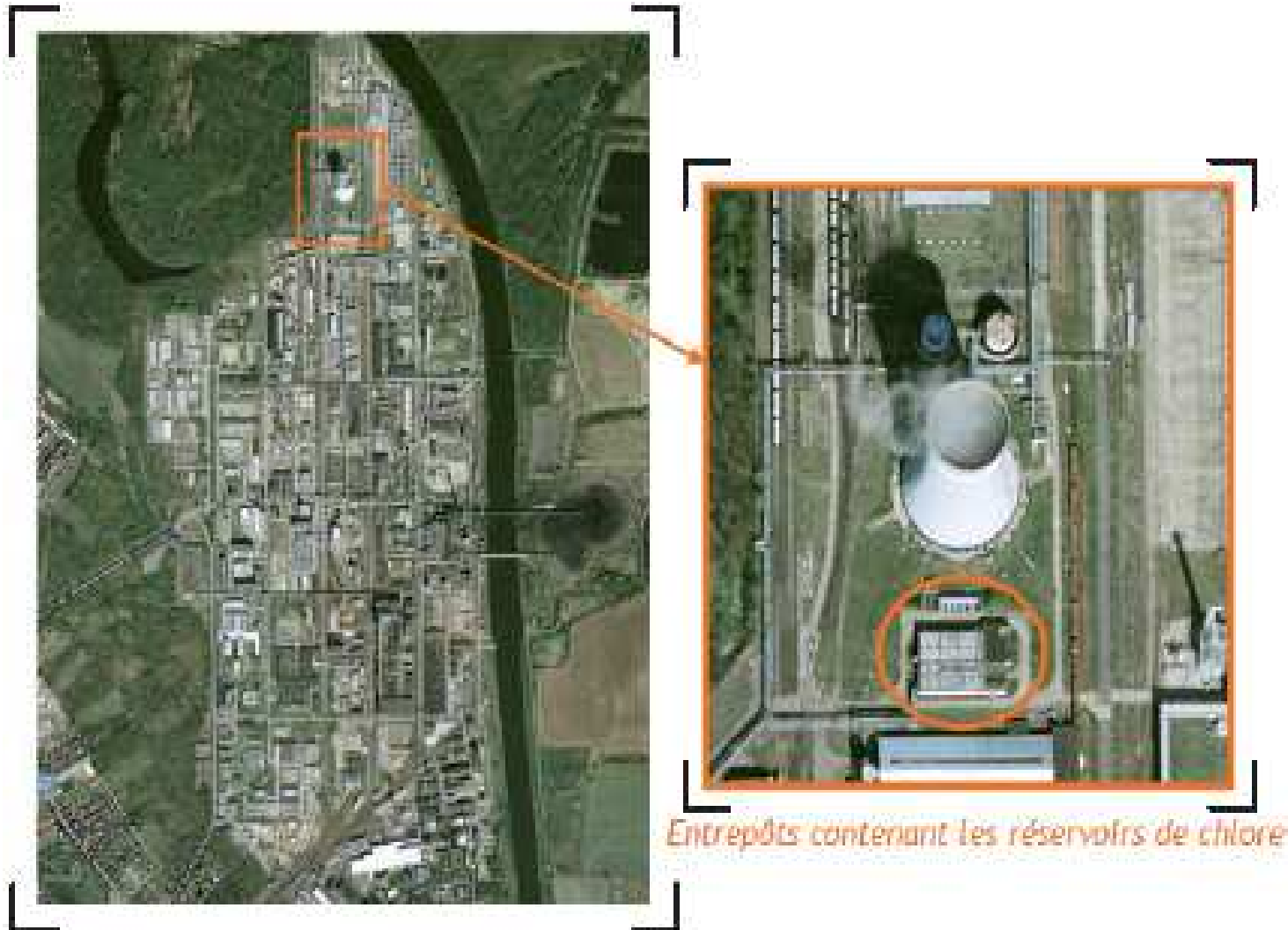
Niveau de la crue =  
Niveau centennal + **1,3 m**

Déroulement de la crue =  
⇒ 19 h : vigilance (niveau 1)  
⇒ 10 h (+1j) : possibilité crue centennale  
⇒ 17 h (+1j) : niveau 2  
⇒ 3 h (+2j) : niveau 3 (danger d'inondation)  
⇒ Entrée de l'eau sur le site

Normalement : **PLUSIEURS JOURS** entre  
les niveaux d'alerte



- Rejet accidentel de chlore dans un complexe chimique (2002)
  - Inondation de réservoirs de chlore dans un bâtiment

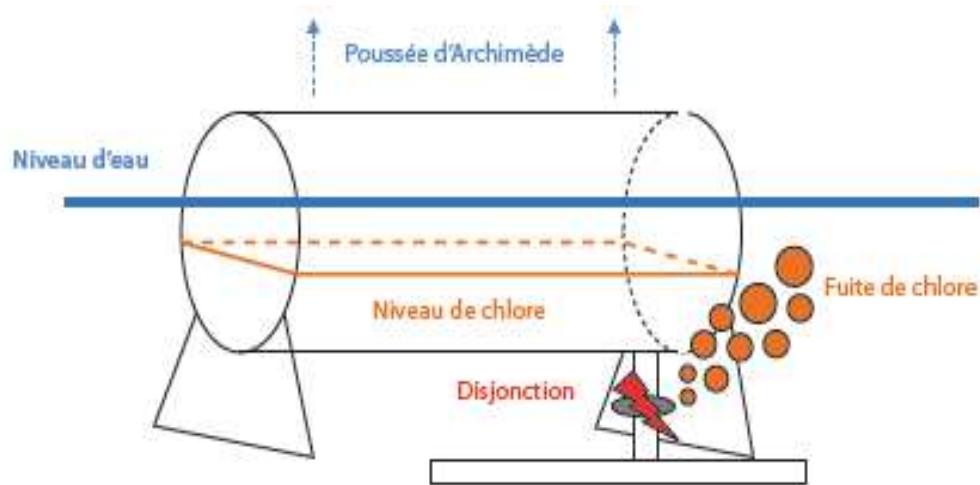


- Rejet accidentel de chlore dans un complexe chimique (2002)

Poussée d'Archimède

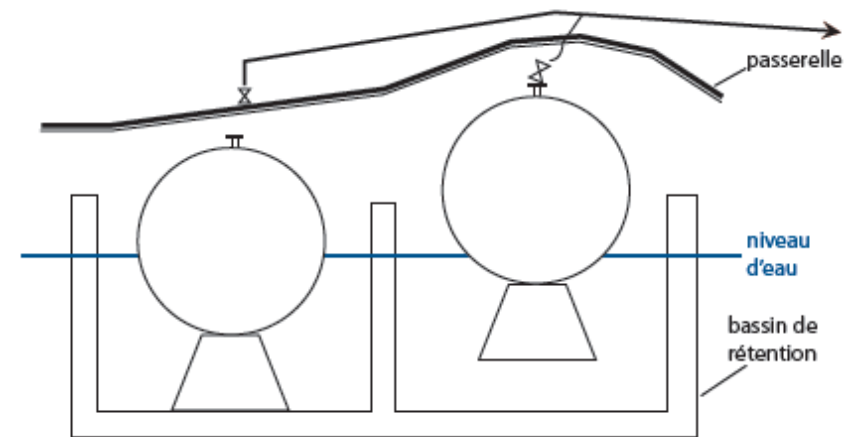
⇒ Soulèvement des réservoirs « vides »

⇒ Conséquence directe



⇒ Rejet dans l'eau  
depuis le réservoir « vide »

⇒ Conséquence indirecte



⇒ Rejet dans l'air  
depuis un réservoir plein

- Rejet accidentel de chlore dans un complexe chimique (2002)



**Végétation touchée par  
le rejet de chlore**

**Niveau d'eau**

**Végétation intacte**

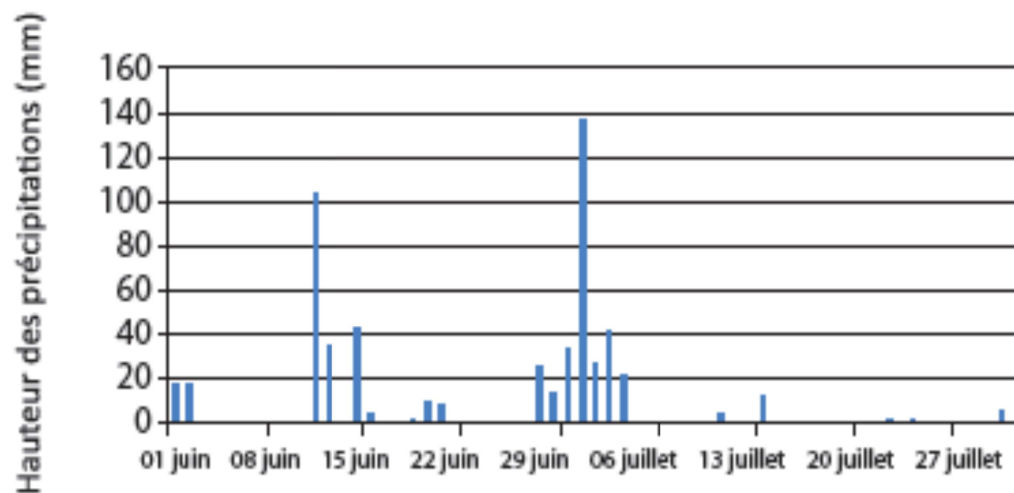


- Rejet d'hydrocarbures dans une raffinerie (2007)

3 m d'eau sur le site  
1,2 m au-dessus des digues

Décision d'engager la  
procédure d'arrêt normal le  
30 juin à 19 h 50

Entrée de l'eau sur le site  
avant minuit



# Accidentologie et conséquences des inondations de sites industriels

## • Rejet d'hydrocarbures dans une raffinerie (2007)

Arrêt normal :  
bacs remplis  
(remplissage  
gravitaire depuis  
entité distincte)

Fermeture de la  
vanne sur site  
(00h45) :  
impossible car  
inaccessible

Seconde vanne  
sur entité  
distincte



Fermeture à  
distance impossible  
(perte  
d'alimentation)

Rivière  
infranchissable  
(route ou bateau)

Hélicoptère



Fermeture de la  
vanne : 11h30

INERIS

maîtriser le risque  
pour un développement durable

# Accidentologie et conséquences des inondations de sites industriels

- Rejet d'hydrocarbures dans une raffinerie (2007)

1 h de débordement

300 m<sup>3</sup> rejetés



Débordement du réservoir 8010



**INERIS**

maîtriser le risque  
pour un développement durable



- Explosions et incendie de peroxydes organiques sur un site chimique (2017)

- Usine chimique au Texas touchée par l'ouragan Harvey
- Fabrication et stockage de peroxydes organiques
- Particularité des PO : décomposition exothermique à température ambiante



Source : Caught in the Storm – Extreme Weather Hazards, CSB



- Explosions et incendie de peroxydes organiques sur un site chimique (2017)

## Débâcle?

- Perte du transformateur principal
- Perte du groupe de secours
- Perte du tracteur-locomoteur
- Arrêt des groupes frigorifiques des conteneurs réfrigérés
- Explosions/Incendie de 3 remorques
- Pollutions?

## Accident maîtrisé?

- Mise en œuvre du plan d'urgence
  - Décision d'arrêter l'alimentation électriques des entrepôts frigo
  - Transfert des PO en zone non inondée vers d'autres entrepôts et dans des remorques réfrigérées
  - Évacuation du personnel
- Incendie volontaire des 6 remorques restantes
- Evacuation de la population avoisinante
- Bilan : pas de perte humaine

# Accidentologie et conséquences des inondations de sites industriels



*Tuyauterie arrachée  
(Japon-Tsunami 2011)*



*Réservoir sous pression: renversement  
(Japon-Tsunami 2011)*



*Réservoir atmosphérique: Soulèvement,  
glissement, renversement  
(Japon-Tsunami 2011)*



*Impact d'objet flottant (Japon-Tsunami 2011)*

- **Base de données ARIA du BARPI**

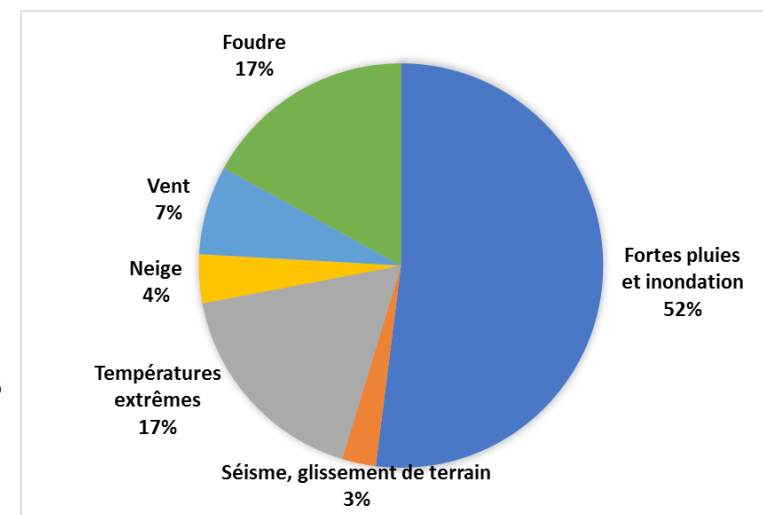
- 277 événements impliquant des inondations (entre 01/01/1992 et 31/12/2016)
  - Dont 38 en 2016 en France et 17 en région Centre Val-de-Loire (par précipitations directes, crues de la Seine et des affluents de la Seine et de la Loire)

- 4 types d'inondations répertoriés :

- Submersions par eaux de pluie (épisodes cévenols) ou par rupture de canalisation d'eau
- Crues de cours d'eau
- Ruptures de digues ou de barrages
- Remontées de nappes phréatiques

- Secteurs d'activités industrielles exposés : TOUS !

- Industrie chimique, raffineries et dépôts pétroliers
- Canalisations de transport,
- Installations de stockage de gaz souterrain,
- Industrie agroalimentaire,
- Carrières, centres de traitement de déchets, exploitations agricoles

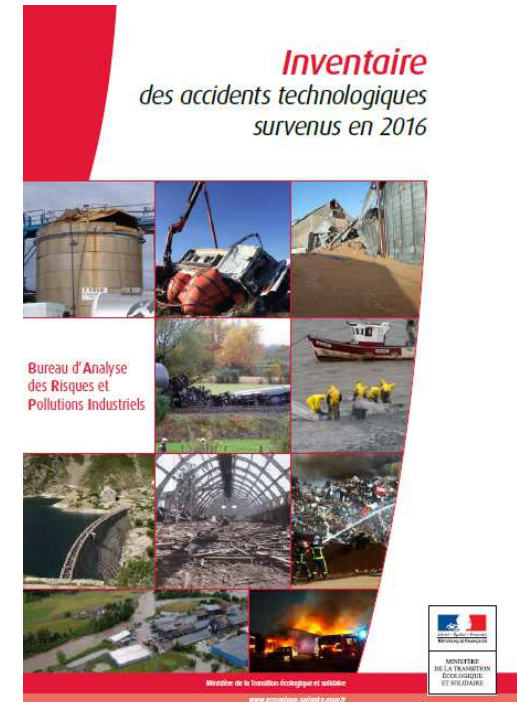
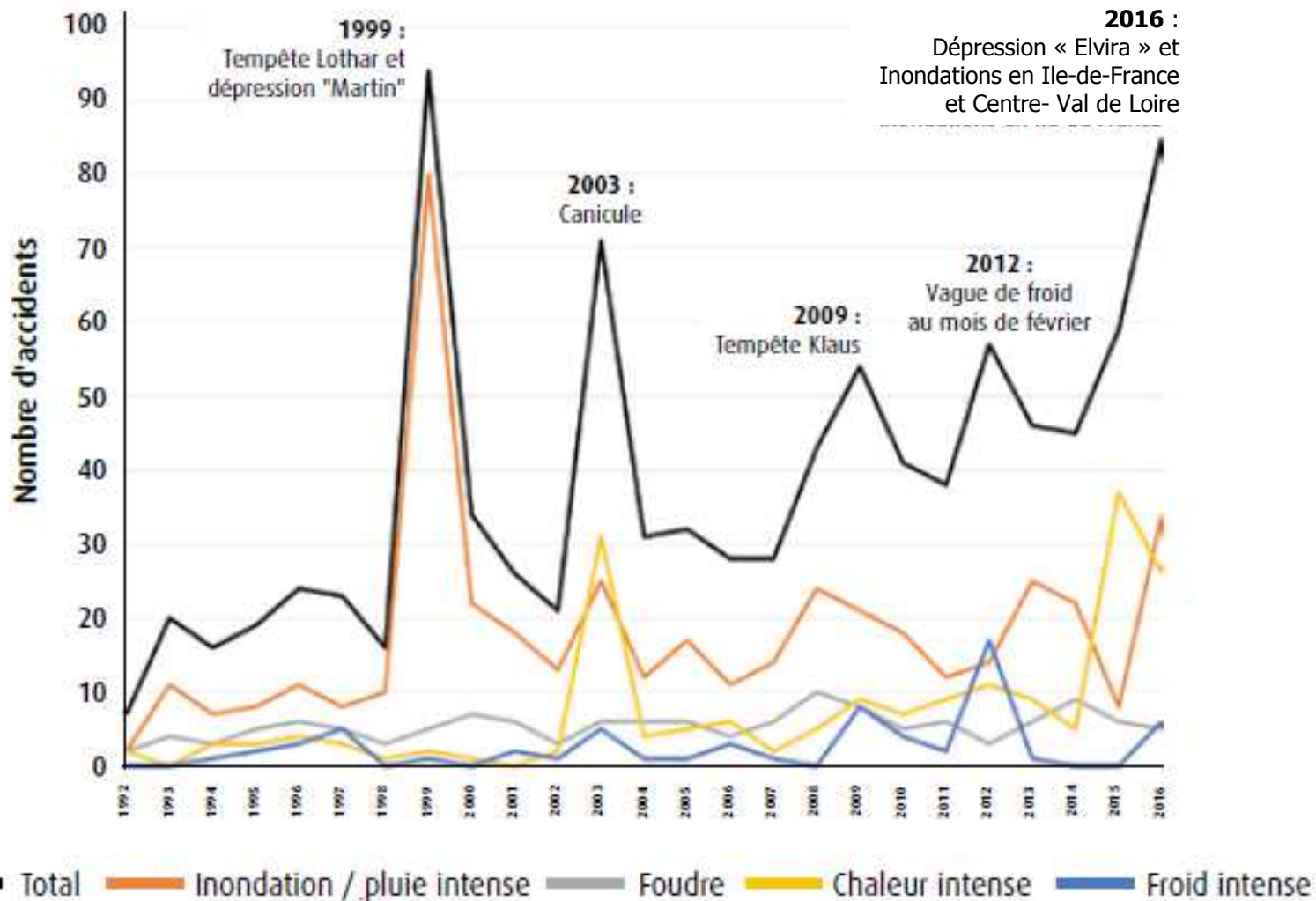




# Accidentologie et conséquences des inondations de sites industriels

- Base de données ARIA du BARPI

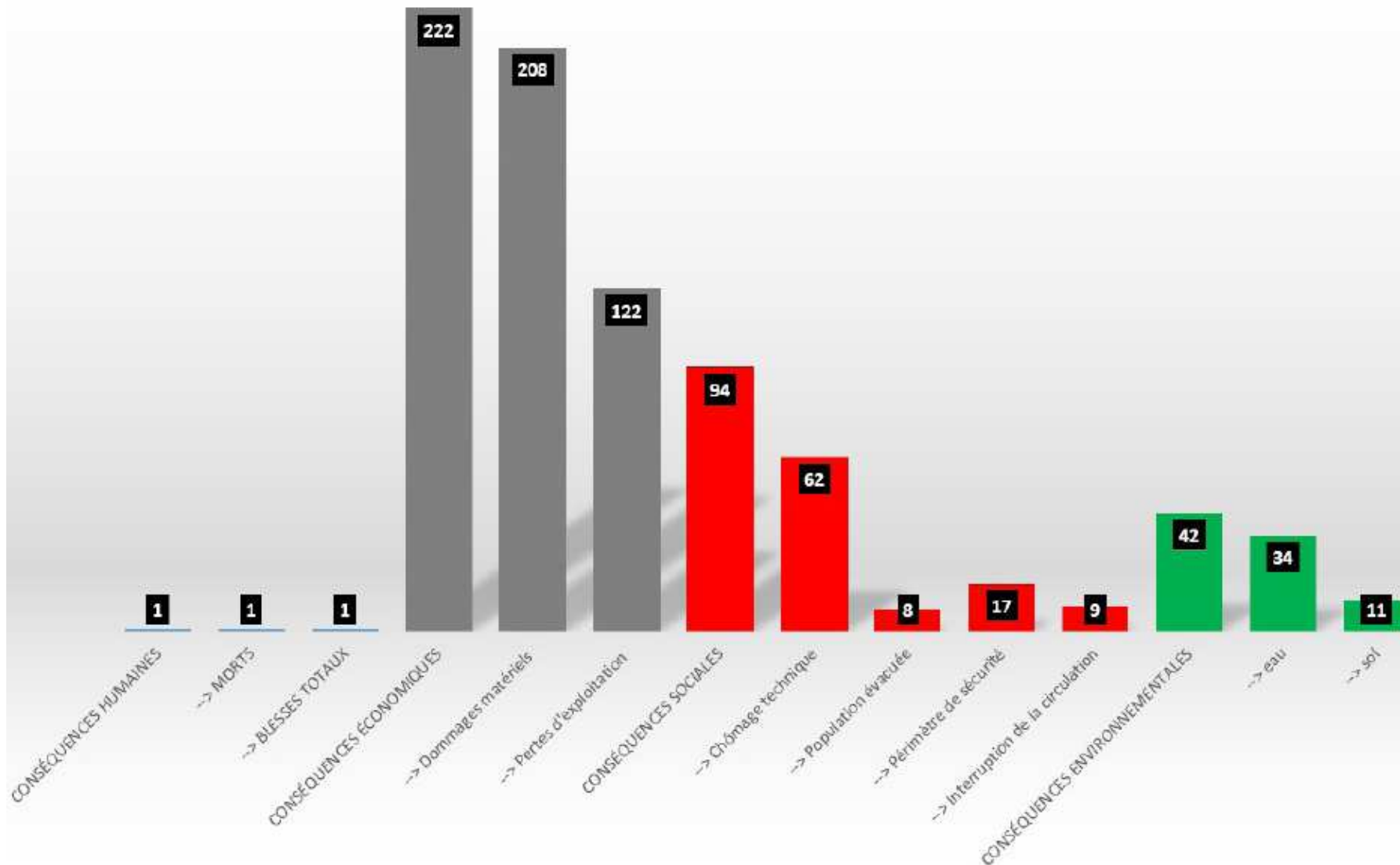
Événements naturels mis en cause





# Accidentologie et conséquences des inondations de sites industriels

- Base de données ARIA du BARPI



- **Conséquences et enseignements tirés :**
  - Phénomène dangereux prédominant : rejet de matières dangereuses ou polluantes
    - ⇒ Lessivages des sols,
    - ⇒ Ruptures de capacité,
    - ⇒ Débordement des ouvrages de stockages de déchets liquides (traitement des effluents aqueux)
  - Quelques incendies
    - ⇒ insuffisance de contrôle des installations électriques après inondation : court-circuit
  - Dans 50% des cas, l'arrêt des installations est impératif
  - Remise en service (partielle dans les premiers temps): plusieurs jours -> semaines
  - Plan d'urgence = conséquences réduites
    - Etude FM GLOBAL portant sur 118 sinistres inondations :
      - ⇒ Sur 72 cas avec plan d'urgence, coût moyen des dommages : 1,2 M€
      - ⇒ Sur les 46 autres, coût moyen des dommages : 4,6 M€
      - ⇒ Bonne application des plans d'urgence = Reprise de l'activité de production plus rapide

- Causes

- Problématiques techniques et organisationnelles :

- Dès la conception des installations:

- => Insuffisance de l'analyse de risques

- => Sous-dimensionnement des réseaux et moyens d'évacuation des eaux de submersion

- => Absence de mise en place et suivi d'ouvrage de protection

- Lors de l'exploitation des installations:

- => Absence de veille météorologique

- => Gestion aléatoire des stockages de matières dangereuses

- => Manque de contrôle préalable des moyens de secours

- => Insuffisance de formation des opérateurs...

## 2. Démarche de maîtrise du risque inondation dans les ICPE



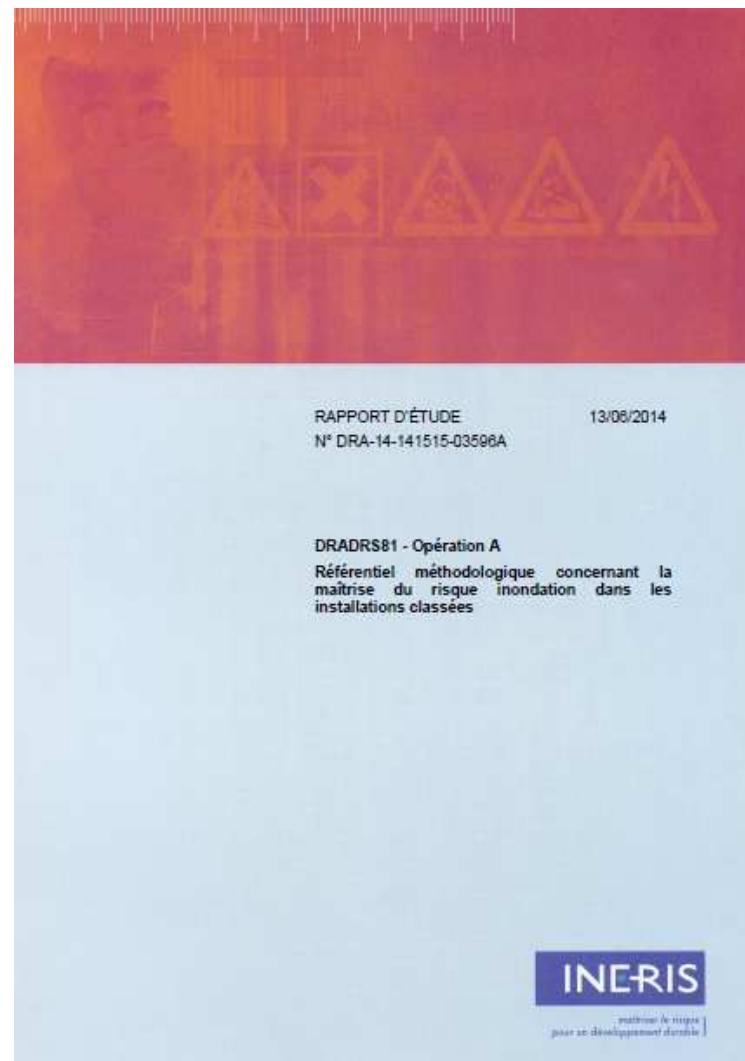
# Démarche de maîtrise du risque inondation dans les ICPE

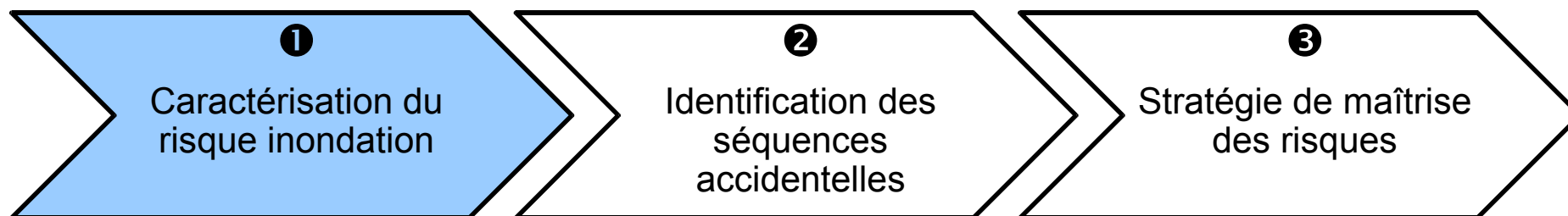
- Référentiel méthodologique pour la prise en compte du risque inondation dans les installations classées (2014) :

➤ Disponible sur :

=> <http://www.ineris.fr/>

=> <http://primarisk.ineris.fr/>

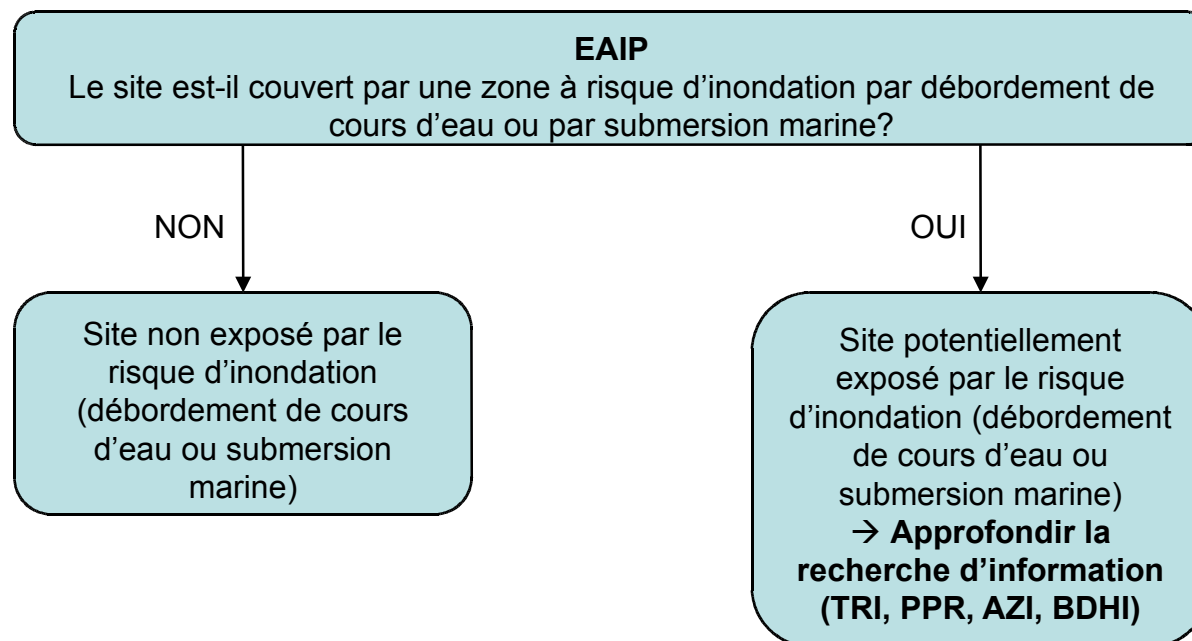




- Documents de référence sur l'aléa : TRI, PPRI, AZI, BDHI
  - Type d'inondation : débordement de cours d'eau (crue lente, crue rapide), ruissellement, remontée de nappe phréatique, etc.
  - Hauteur d'eau sur site
  - Vitesse des écoulements
  - Vitesse de montée/descente des eaux
  - Durée de submersion

# Démarche de maîtrise du risque : 1<sup>ère</sup> étape

- Le site est-il concerné par l'aléa inondation?
  - Filtre exclusion :
    - Pour les phénomènes de débordement de cours d'eau, de ruissellement et de submersion marine : cartes des **EAIP** (Enveloppes Approchées des Inondations Potentielles), réalisées dans le cadre de la transposition de la Directive Inondation



- Pour le phénomène de remontée de nappes : **cartes de sensibilité** réalisées par le BRGM (<http://www.georisques.gouv.fr/>)

# Démarche de maîtrise du risque : 1<sup>ère</sup> étape

- Le site est-il concerné par l'aléa inondation?
  - Si le site est potentiellement concerné, les informations sur les caractéristiques des aléas sont disponibles dans les documents suivants, par **ordre de priorité** :
    - 1) **Cartographies sur les TRI** (Territoire à Risque Inondation) : permet de connaître la vulnérabilité du territoire et les surfaces inondables par trois scénarios (fréquent, moyen, extrême) :
      - Exposition des établissements sensibles (hôpitaux, écoles, établissements Seveso),
      - Emplacements stratégiques des réseaux routiers,
      - Sensibilité des réseaux d'énergie, d'eau potable ou d'assainissement.→ Consultables sur les sites des D(R)EAL de bassin et sur le site du MTES.
    - 2) **PPR (Plan de Prévention des Risques)** : document valant servitudes d'utilité publiques (SUP) et annexés aux documents d'urbanisme. Ces plans sont fondés sur la superposition de:
      - Cartographie des aléas (aléa au minimum centennal pour le PPRi) et
      - Cartographie des enjeux.→ Consultables sur les sites des Préfectures de Département ou des D(R)EAL de chaque région et le portail Géorisques (<http://www.georisques.gouv.fr/>)



# Démarche de maîtrise du risque : 1<sup>ère</sup> étape

3) **AZI** (Atlas des Zones Inondables) : permet d'identifier et de délimiter les couloirs d'écoulement des eaux et les zones d'expansion des crues.

→ Cartes régionales consultables sur les sites des D(R)EAL et le portail Géorisques

NB : l'AZI ne donne qu'un temps de retour unique pour l'aléa (généralement 100 ans ou la fréquence du plus fort aléa connu).

4) **BDHI** (Base de Données Historiques sur les Inondations) recense et décrit les phénomènes de submersions dommageables d'origine fluviale, marine, lacustre et autres, survenus sur le territoire français (métropole et départements d'outre-mer) au cours des siècles passés et jusqu'à aujourd'hui.

→ Consultable sur le site : <http://bdhi.fr/appli/web/welcome>

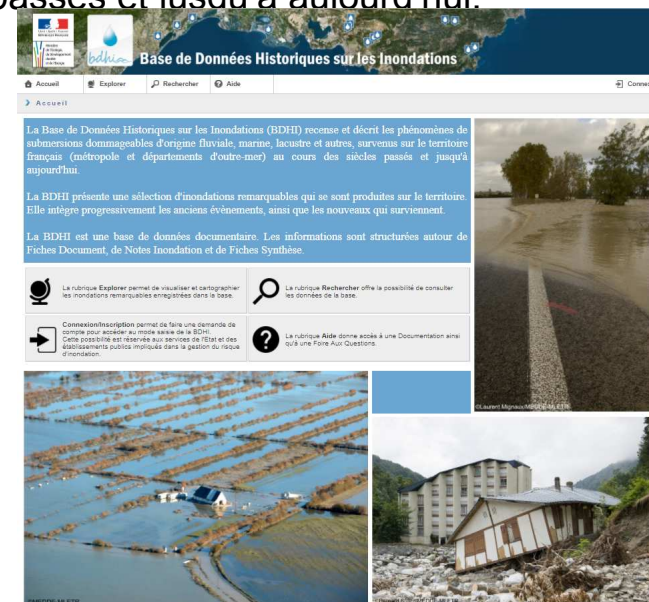
➤ 1<sup>ère</sup> approche : Analyse comparative

- Côte du phénomène/côte topographique du site

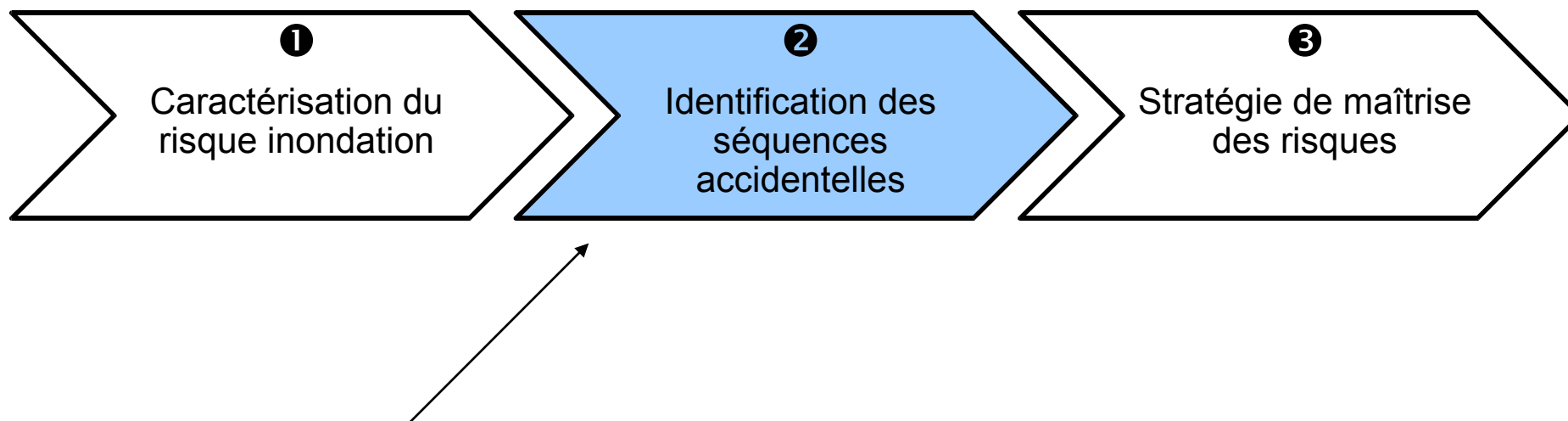
➤ Approche plus fine : prise en compte de la cinétique

- Vitesse d'écoulement
- Vitesse de submersion
- Durée du phénomène

→ Identification des équipements sensibles et priorisation des actions



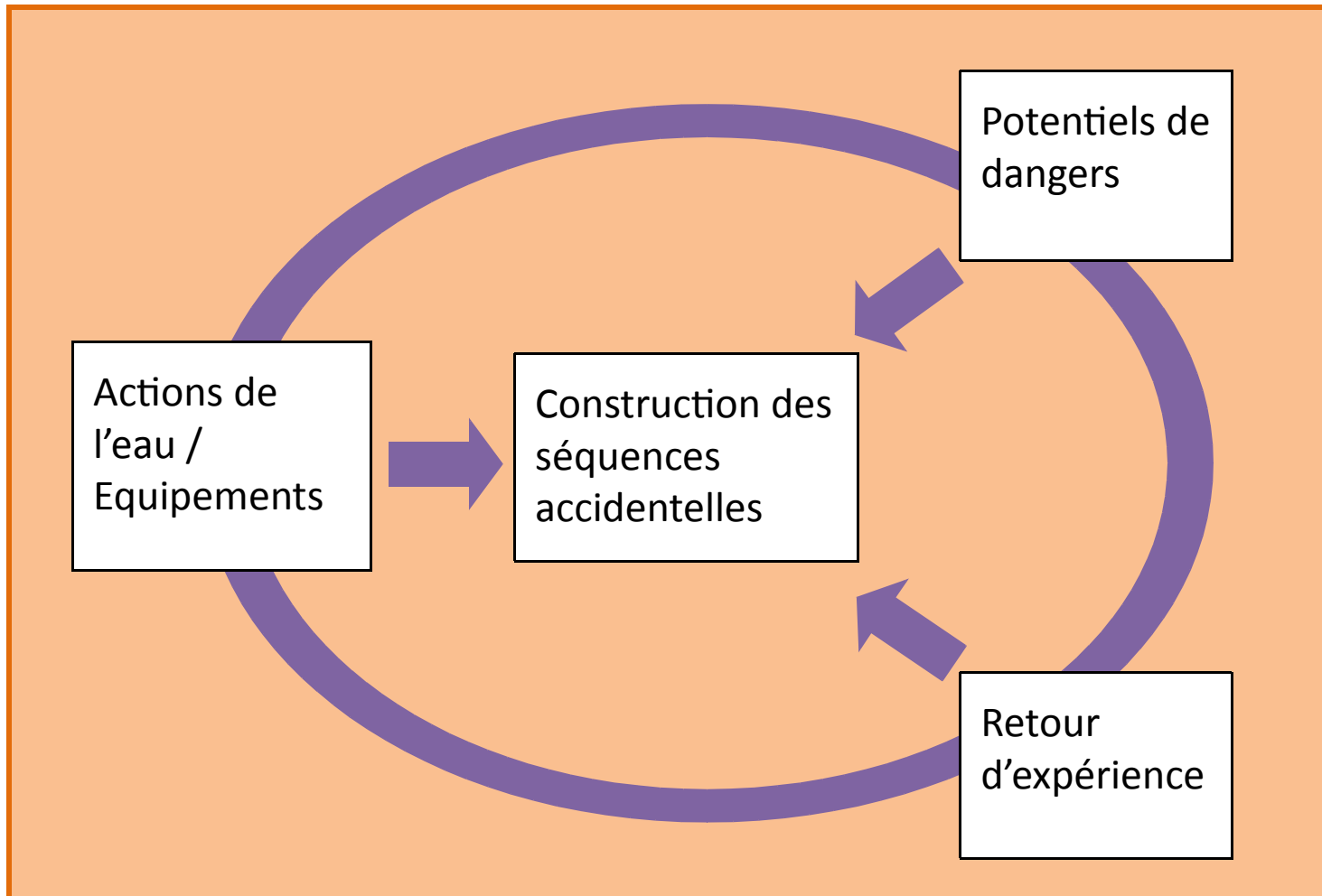
## Démarche de maîtrise du risque : 2<sup>ème</sup> étape



- En combinant l'analyse des potentiels de danger et l'analyse des actions de l'eau sur les équipements industriels :
  - Comportement des substances en cas de rejet accidentel
  - Comportement mécanique des équipements dans un écoulement
  - Conséquences en cas de perte d'utilités

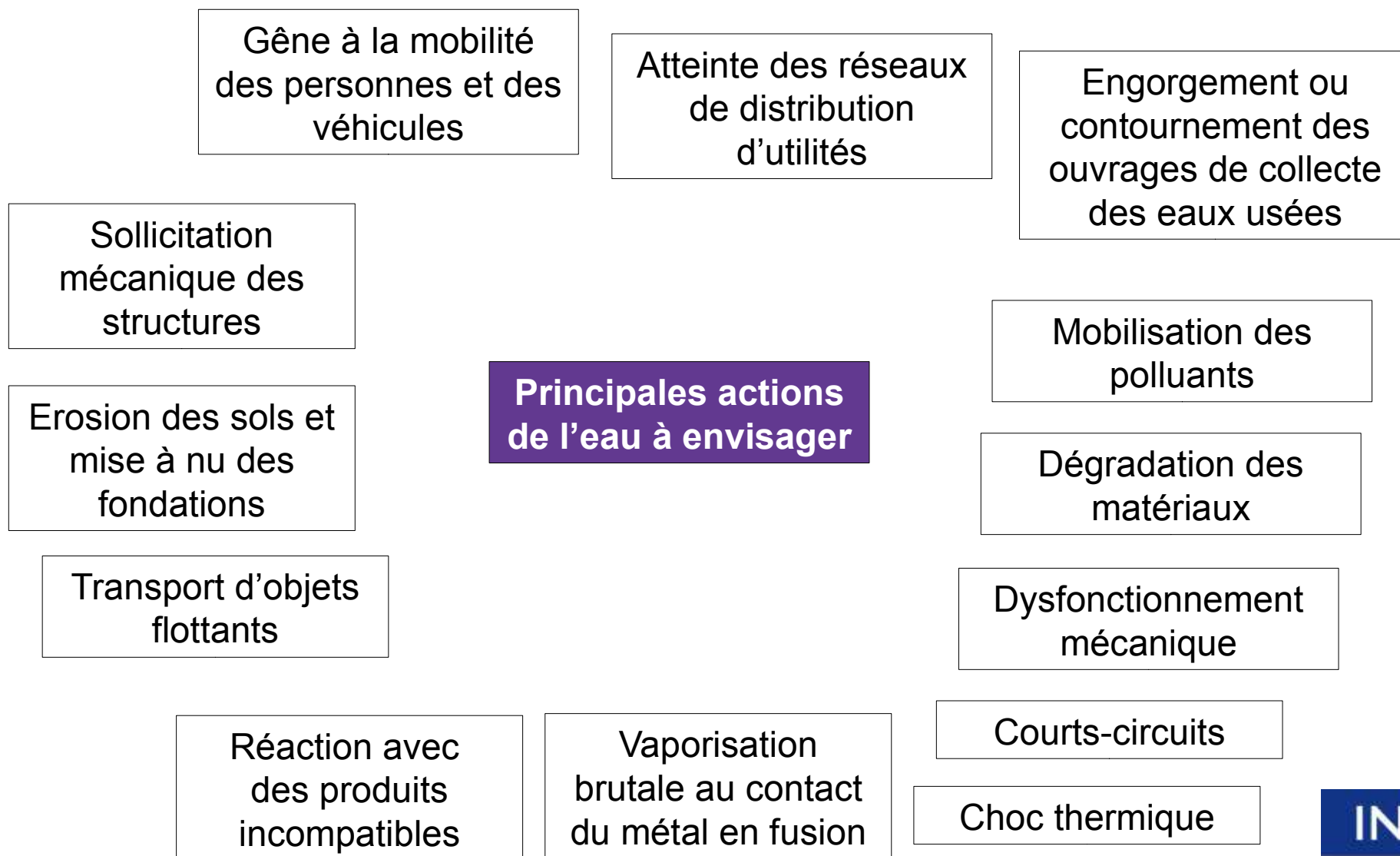
## Démarche de maîtrise du risque : 2<sup>ème</sup> étape

- Identification des séquences accidentelles :



# Démarche de maîtrise du risque : 2<sup>ème</sup> étape

- Principales actions de l'eau à envisager :





# Démarche de maîtrise du risque : 2<sup>ème</sup> étape

- Comportement des substances dans l'eau :
  - Substances chimiques:
    - Substance réagissant violemment avec l'eau
    - Substance générant des gaz inflammables ou toxiques au contact de l'eau
  - Métal en fusion → vaporisation brutale de l'eau
- Outil INERIS d'aide à l'analyse (guide méthodologique de 2014)
  - Données d'entrée : caractéristiques des substances (état physique, classement SEBC, dangers intrinsèques, production d'un gaz toxique ou inflammable au contact de l'eau),
  - Identification des phénomènes dangereux redoutés
  - Conseils de modélisation (modification du terme source, spécificités)

## Liquides

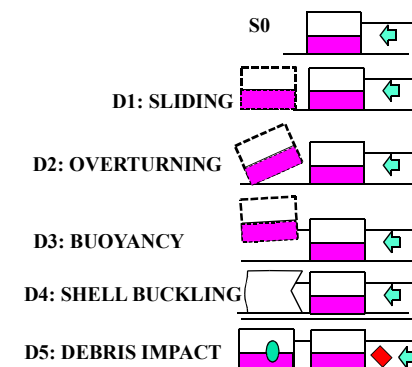
Id	Etat physique	Clas. SEBC	Danger(s) de la substance	Production d'un gaz toxique ou inflammable au contact de l'eau	Type de rejet	Phénomène(s) dangereux redouté(s)	Terme source (modélisation classique)	Modification des termes sources ?	Spécificité(s) de modélisation ?
L01a	Liquide	E ED DE FE FED	Toxique	Pas de réaction	Rejet sous l'eau	Nappe évaporante à la surface de l'eau ⇒ Formation d'un nuage toxique dans l'air	Débit massique à l'orifice Quantité rejetée Direction du rejet à l'atmosphère Vitesse du rejet à l'atmosphère Taille de la nappe Épaisseur de la nappe Taux d'évaporation surfacique Rugosité	Diminue à cause de la contre-pression Diminue à cause de la contre-pression Verticale vers le haut Diminue Dépend du taux d'évaporation, rugosité Diminue Taux d'évaporation sur l'eau Diminue	Polymérisation ? (Taux, effets ?)  Dissolution ? (Taux, exothermicité, effets ?)  Caractérisation de la nappe liquide à la surface - Taux d'évaporation sur l'eau

## Démarche de maîtrise des risques : 2<sup>ème</sup> étape

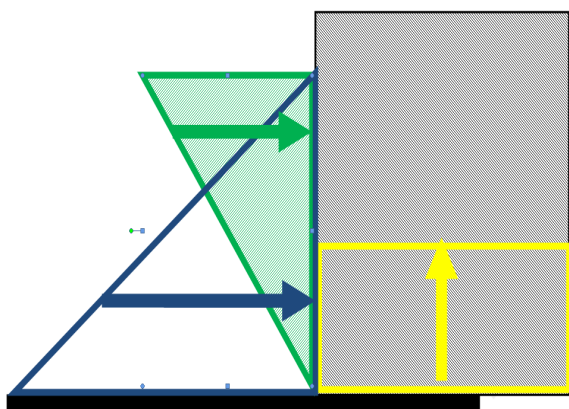
- Modélisation des phénomènes dangereux en contexte inondé : des spécificités à considérer
  - Rugosité de l'eau diminuée
    - Epaisseur limite de nappe plus fine
    - Nappe plus large à volume constant
  - Taux d'évaporation surfacique augmente
    - Volume formant la nappe plus faible
    - Nappe moins large à épaisseur constante
  - Spécificités des rejets sous l'eau
    - Impact de la dissolution
    - Vitesse et direction du rejet différente

# Démarche de maîtrise des risques : 2<sup>ème</sup> étape

- Analyser le comportement mécanique des équipements industriels dans un écoulement :
  - A l'aide de modèles permettant de prédire le comportement mécanique d'équipements industriels :
    - Equipements: réservoirs atmosphériques, réservoirs sous pression, tuyauteries
    - Fonction des caractéristiques de l'équipement (géométrie, produit, taux de remplissage / pression dimensionnement) et de la sollicitation (hauteur d'eau, vitesse d'écoulement)
    - Intégrant les principaux modes de défaillance



## Modèles simples (formulation analytique)

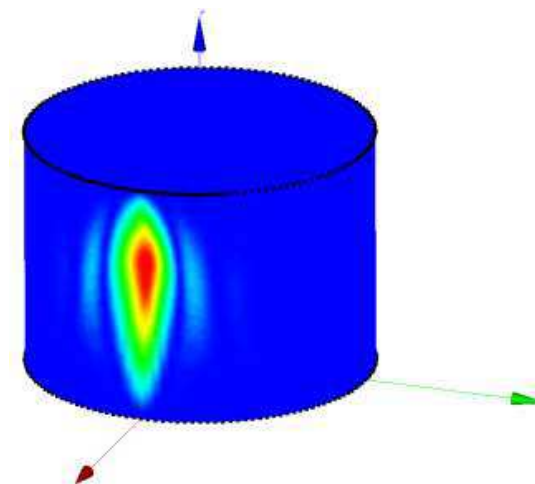


Pression hydrostatique,  
Pression hydrodynamique  
Poussée d'Archimède

Formule	Caractéristiques
$P_a = \rho_{eau} g V$	V : Volume de la structure immergée $\rho_{eau}$ : la masse volumique de l'eau g : intensité de la pesanteur

Modèle analytique pour réservoir atmosphérique (soulèvement, glissement, renversement)

## Modèles avancés numériques



Modèle numérique Réservoir soumis à un impact

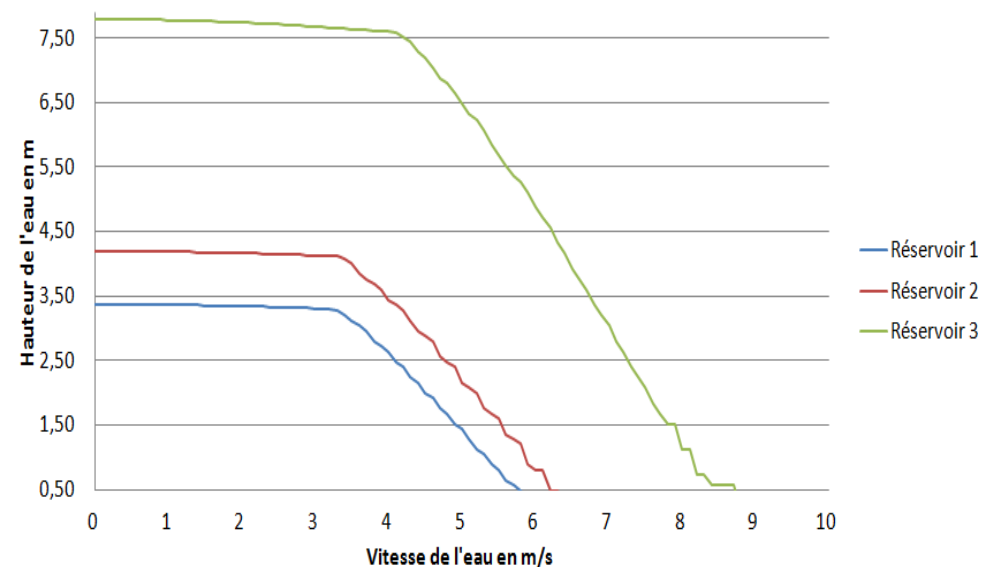
# Démarche de maîtrise des risques : 2<sup>ème</sup> étape

- Analyser le comportement mécanique des équipements industriels dans un écoulement :
  - A l'aide de modèles permettant de prédire le comportement mécanique d'équipements industriels :
    - Ex. Réservoirs atmosphériques



Données réservoir	RESERVOIR 1	RESERVOIR 2	RESERVOIR 3
Hauteur du réservoir (m)	8	10	19
Rayon interne (m)	5,75	7	10
Volume (m <sup>3</sup> )	830	1540	5970
Épaisseur maximale de virole (m)	0,008	0,01	0,0015
Épaisseur minimale de virole (m)	0,005	0,005	0,007
Épaisseur du fond (mm)	5	5	10

Type de réservoir	Réservoir N°1	Réservoir N°2	Réservoir N°3
Fût plein de 200 Litres	21	21	33
Véhicule Automobile	9	9	14
Conteneur maritime	6	6	9



Abaque donnant la hauteur d'eau-vitesse d'écoulement au-delà desquelles la tenue du réservoir n'est plus garantie (taux de remplissage 50%)

*Vitesse d'écoulement au delà de laquelle l'intégrité du réservoir n'est plus garantie en cas d'impact*



## Démarche de maîtrise des risques : 2<sup>ème</sup> étape

- Vulnérabilité mécanique des équipements industriels

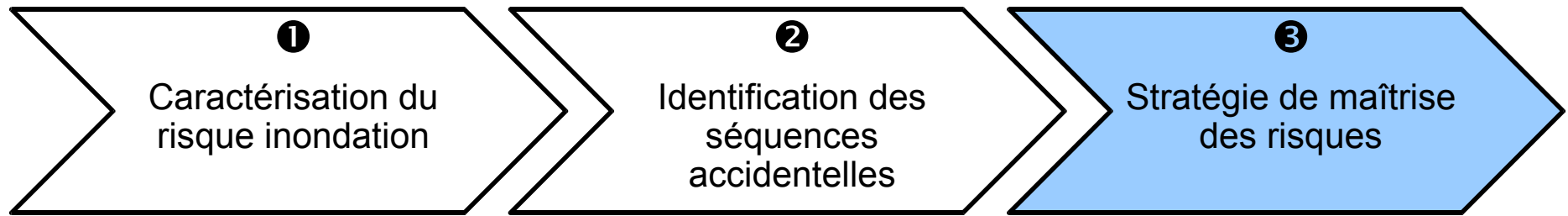
<b>Réservoirs</b>
Voilement circonférentiel de la robe
Soulèvement du réservoir
Renversement ou glissement du bac
Affouillement
Impact d'objet flottant

<b>Tuyauteries</b>
Flexion selon l'effort latéral
Soulèvement de la tuyauterie
Impact d'objet flottant

- Disponibilités des utilités:
  - **Electricité : le plus important**
    - Pilote la mise en sécurité des installations (arrêt, transfert...) mais aussi de nombreux équipements de sécurité
    - Est conditionné par ou conditionne d'autres utilités
    - Bien souvent, nécessité de mise en arrêt avant inondation du poste (sécurité des opérateurs)
    - Vigilance à avoir sur la possibilité d'une coupure précoce
  - **Autres utilités importantes :**
    - Azote (inertage)
    - Eau / fluides frigorigènes (refroidissement)
    - Gaz naturel (combustion/chauffage)
    - Carburant (groupes électrogènes de secours)

- Problèmes d'accessibilité:
  - **Perte d'accès local à une installation**
    - Manœuvre opérateur?
    - Surveillance des procédés en cours?
  - **Perte d'accès global au site**
    - Lieu de résidence du personnel (et notamment celui impliqué dans la gestion de l'événement) impacté par l'inondation?
    - Gestion des entrées/sortie du personnel?
    - Intervention des services de secours?

# Démarche de maîtrise des risques : 3<sup>ème</sup> étape

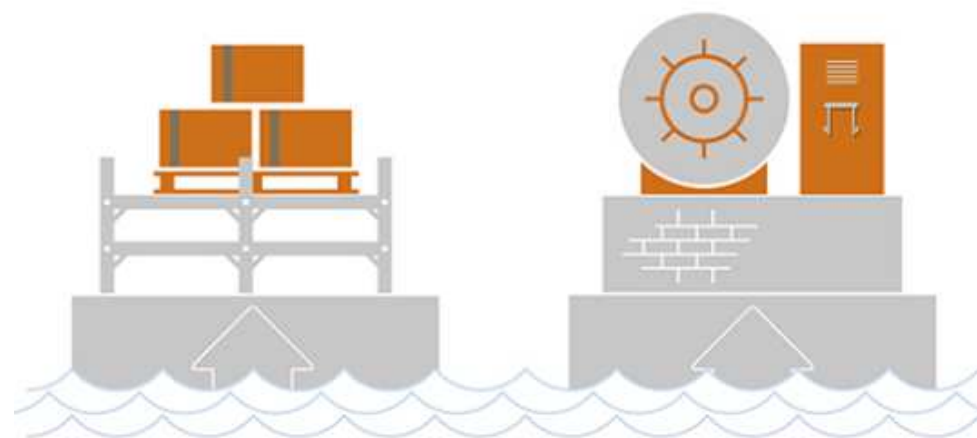
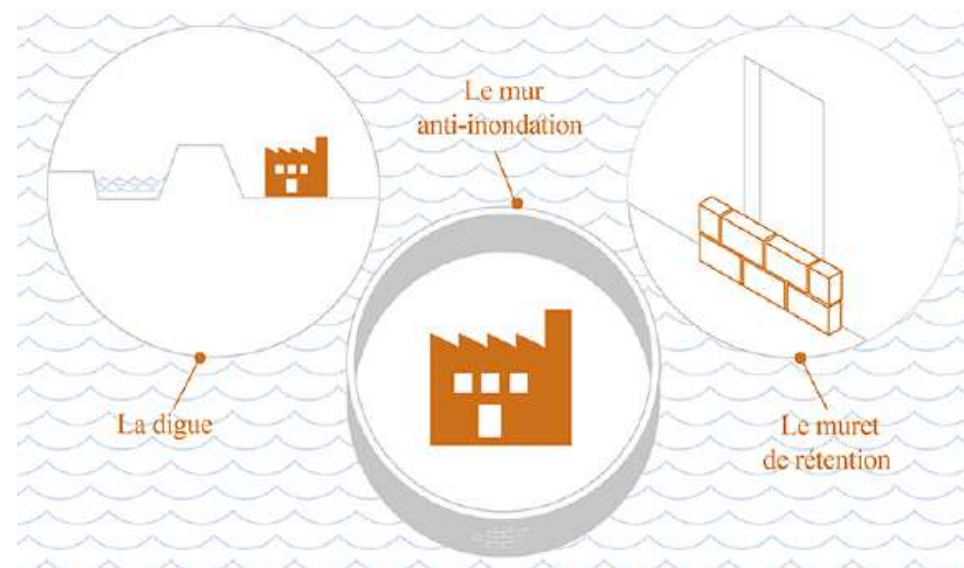


- Protection par des dispositifs constructifs pérennes
- Procédure de mise en sécurité en phase d'alerte



# Démarche de maîtrise des risques : 3<sup>ème</sup> étape

- Les dispositifs constructifs pérennes :
  - Construction de digues de protection,
  - Surélévation générale ou locale des installations et bâtiments au-dessus de la ligne d'eau,
  - Ancrage ou renforcement des structures et équipements industriels immergés (pour compenser la poussée d'Archimède)
  - Amarrage permanent des équipements (pour limiter leurs déplacements en cas de flottaison).
  - Dispositifs ou mesures de prévention:
    - Maintien des zones d'écoulement préférentiel (carrières...)
    - Dimensionnement adéquat des réseaux
    - Pas d'obstacles à l'écoulement de l'eau (clôtures...)



Source : FM GLOBAL

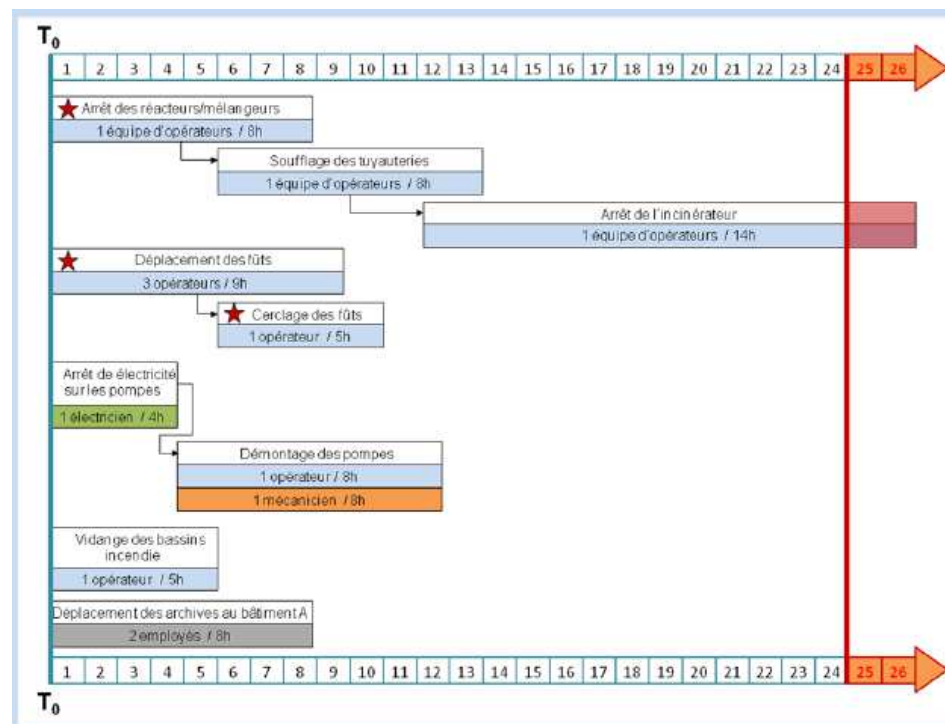
# Démarche de maîtrise des risques : 3<sup>ème</sup> étape

## • La procédure de mise en sécurité en phase d'alerte

Démarche:

➤ Caractériser et planifier chaque action de mise en sécurité (temps et ressources nécessaires) :

- Mise à l'arrêt des équipements
- Surélévation temporaire/Déplacement des contenants sur une zone non inondable
- Transfert des substances
- Amarrage ou arrimage provisoire
- Obturation des réseaux et des ouvertures des bâtiments industriels : mise en place de batardeaux

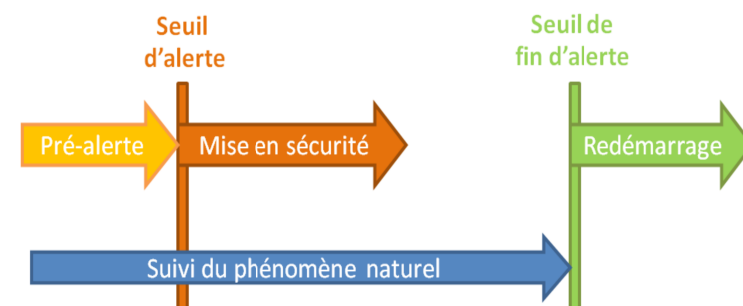
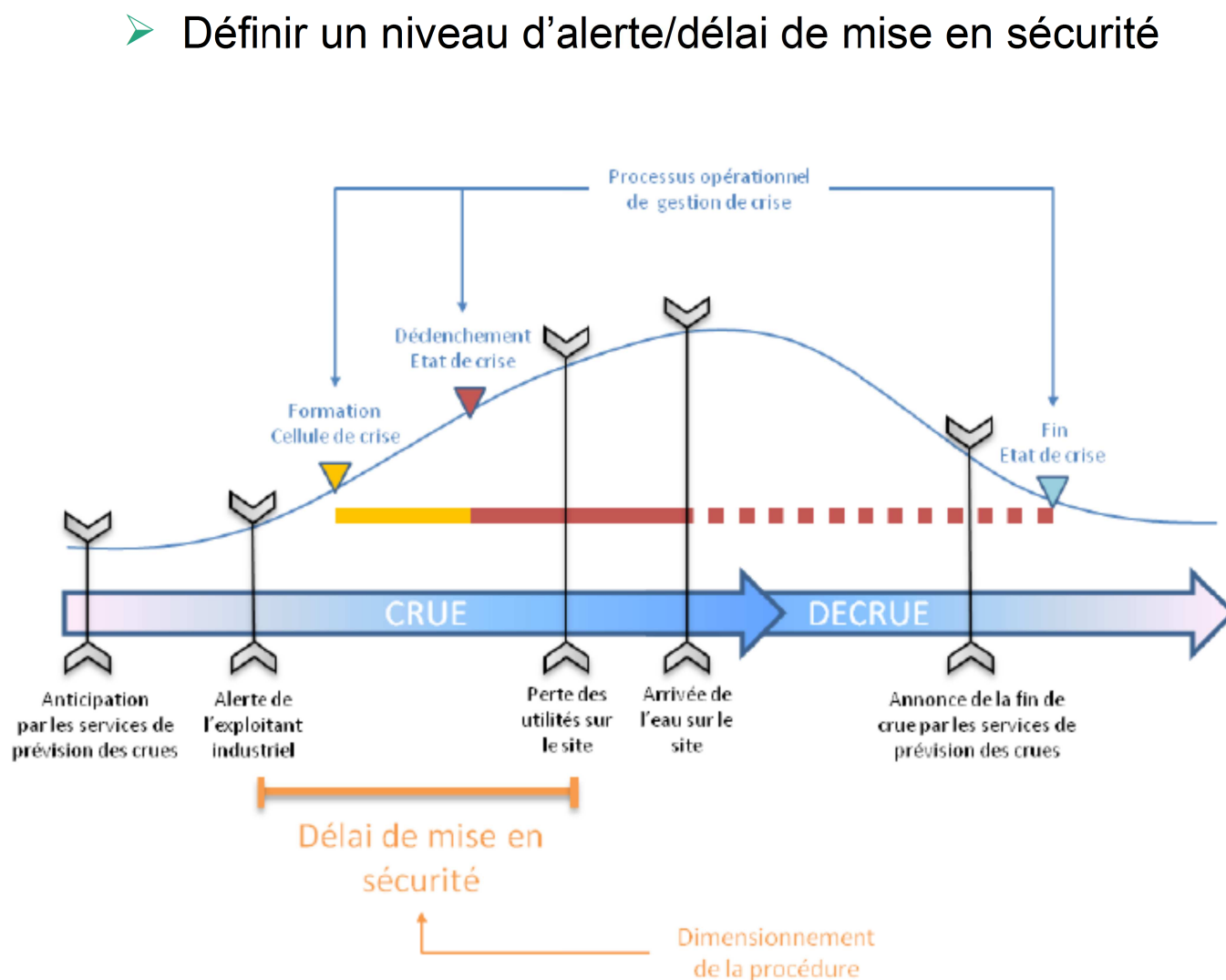


# Démarche de maîtrise des risques : 3<sup>ème</sup> étape

- La procédure de mise en sécurité en phase d'alerte

Démarche:

- Définir un niveau d'alerte/délai de mise en sécurité



**Merci de votre attention**