Comparaison des scénarios de gestion des déchets de StocaMine

Approche méthodologique et premiers résultats

COPIL du 1er avril 2011

INERIS
maîtriser le risque
pour un développement durable

Plan de la présentation

1. Rappels de la mission confiée à l'INERIS
2. Présentation des résultats de la phase 0 et des premiers résultats de la phase 1
3. Conclusions et échanges avec le COPIL

INERIS
maîtriser le risque
pour un développement durable

Rappels de la mission confiée à l'INERIS

Phase 0 - Analyse des données existantes

- Rappel du bilan des études antérieures
- Études complémentaires

Phase 1 – Analyse comparative des scénarios potentiels les plus probables

- Méthodologie retenue – scénarios comparés - risques retenus – risques non pris en compte – les éléments dimensionnants - Données prises en compte
- Analyse des résultats
- Finalisation de la phase 1

Phase 2 (non initiée)- Analyse détaillée du scénario retenu

- Évaluation de tous les risques identifiés
- Études des mesures de maîtrise des risques
- Recommandations sur leur mise en œuvre <----> études complémentaires
- Montage des dossiers administratifs

INERIS
maîtriser le risque
pour un développement durable

Phase 0 – Analyse des données existantes

- **Objectifs : faire l'inventaire et collecter les informations nécessaires à la phase 1 (comparaison)**
  - Analyse des documents existants : plus de 40 rapports analysés
  - Sélection des données pertinentes et identification de données manquantes
    - Données établies par StocaMine : données minières, fiches déchets (nature, quantité, caractérisation …), plan de localisation des déchets…
    - Données générées par des BE et Experts missionnés par StocaMine : études géomécanique et hydrogéologique initiales, étude de 3 sites de stockage allemands en mine de sel, estimation des vides miniers résiduels…
    - Données issues de la littérature scientifique et technique : données de comportement mécanique du sel, facteurs de caractérisation de substances toxiques pour l'eau et l'air, statistiques d'accidentologie (mine, BTP, industrie chimique), analyse du cycle de vie (ACV) de sites K1
    - Données produites spécifiquement par l'INERIS (évent. sous-taitées) : études géomécanique, hydrogéologique et géochimique, réajustement et réinterprétation de données précédentes (déchets, volumes de vides/saumure polluée)

INERIS
maîtriser le risque
pour un développement durable

Phase 1 - Méthodologie

- **LOGIQUE DE COMPARAISON DE SCÉNARIOS DU POINT DE VUE DES « PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES » PERMETTANT L'AGRÉGATION D'INFORMATIONS DE NATURES DIFFÉRENTES**
  - Risques sanitaires aigus et chroniques (population générale et travailleurs)
  - Risques accidentels
  - Risques pour l'environnement
  - Risques à court et long termes
- **S'APPUYANT SUR DES MÉTHODOLOGIES D'ÉVALUATION EXISTANTES ET PUBLIÉES**
- **PERMETTANT APRÈS SIMPLIFICATION ET HOMOGÉNÉISATION DE TRAITER DES *DONNÉES HÉTÉROGÈNES EN QUANTITÉ ET EN QUALITÉ*, ET DE SOMMER DES INFORMATIONS DE NATURES DIFFÉRENTES**
- **UTILISANT DES INDICATEURS GLOBAUX DE RISQUE**
- **DÉMARCHE COHÉRENTE, RECONNUE ET NORMALISÉE - ISO 14040/44**
- **EXEMPLES D'APPLICATION**

→ **Aide à la décision**

INERIS
maîtriser le risque
pour un développement durable

Risques / Impacts

PRIS EN COMPTE

- IMPACTS SANITAIRES
  - Travailleurs
  - Population générale
- IMPACTS SUR LA BIODIVERSITÉ

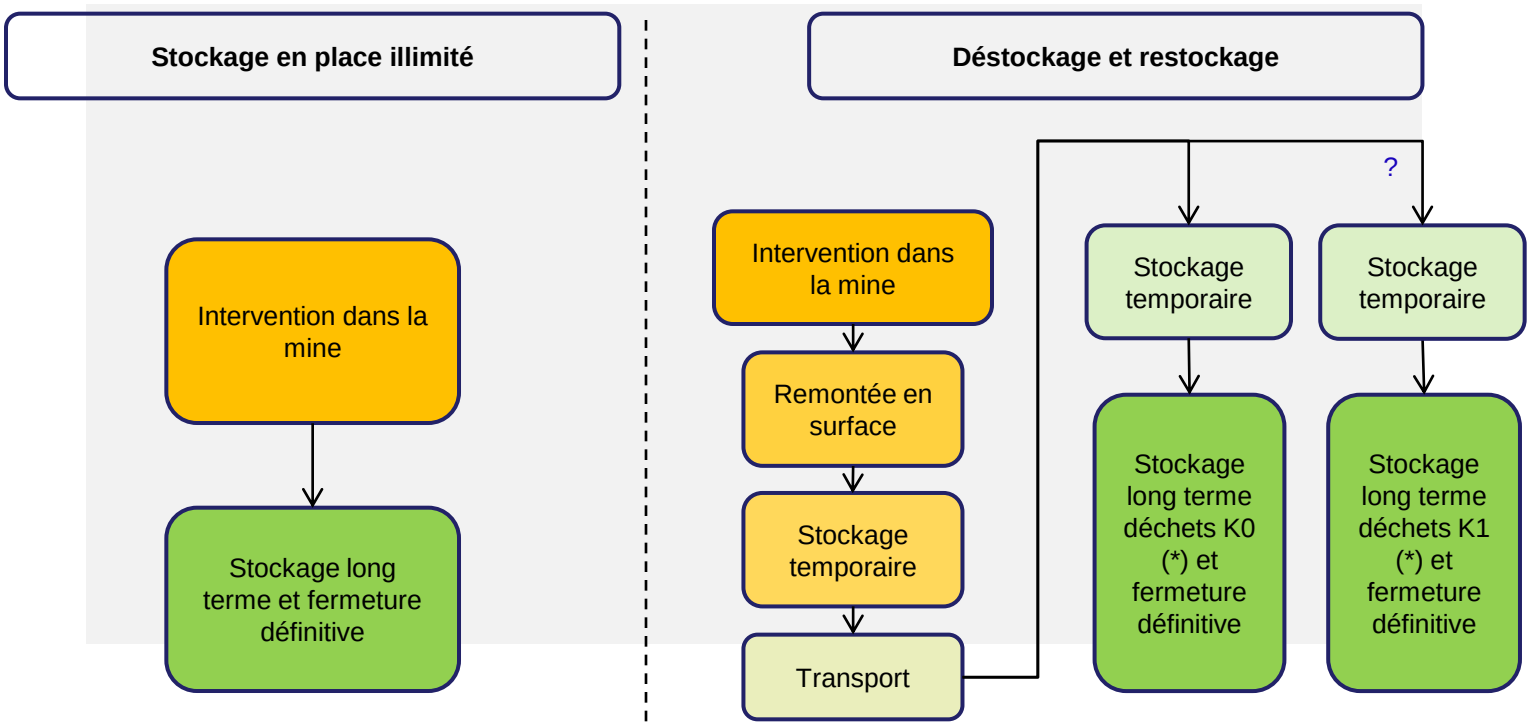
NON PRIS EN COMPTE

- IMPACTS SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE
- IMPACTS SUR LA QUALITÉ DE L'AIR
- IMPACTS SUR LES RESSOURCES NATURELLES
- ENJEUX JURIDIQUES, FINANCIERS ET SOCIOPOLITIQUES

INERIS
maîtriser le risque
pour un développement durable

2. Périmètre de l'étude

Scénarios limites comparés et leurs étapes - Sites cibles



Variantes: A) sans barrière
B) avec barrières

Variantes: C) restockage total (K0 et K1) à Heilbronn
C_{bis}) idem sauf bloc 15 laissé en place
D) restockage K0 à Heilbronn et K1 à Drambon

INERIS
maîtriser le risque
pour un développement durable

Scénarios STOCAMINE : description et facteurs clés (1)

- **DÉCHETS PRÉSENTS : 44 000 T**
- **COMPOSITION**
  - données fournies par StocaMine, réinterprétées par INERIS et exprimées en masse de chaque substance polluante (annexe 1)
- **INCERTITUDES**
  - Sans incidence sur la phase 1 : le même terme source est utilisé dans les différents scénarios
  - Une variation sur ces termes sources ne modifie pas la hiérarchisation des scénarios résultant de la phase 1
  - … mais à détailler pour phase 2 (phase non initiée)
- **PARAMÈTRES CLÉS**
  - l'analyse des résultats fait ressortir que les impacts à long terme - santé et environnement - résultent très majoritairement des substances suivantes : Mercure, Arsenic, Cyanures, Antimoine (annexe 2)
  - Amiante : piégée sur le long terme, prise en compte uniquement pour risque travail (scénario déstockage, court terme)

INERIS
maîtriser le risque
pour un développement durable

Scénarios STOCAMINE : description et facteurs clés (2)

(annexe 3)

- **SCÉNARIO RÉSUMÉ**
  - Fluage et arrivée de saumure - temps de contact saumure/déchets long : atteinte équilibre géochimique
  - Poursuite fluage => expulsion de saumure polluée vers la nappe (300 ans)
- **PARAMÈTRES CLÉS ISSUS DE L'ÉTUDE HYDROGÉOCHIMIQUE**
  - Milieu alcalin (présence de résidus d'incinération)
  - Pour certains métaux : la saumure est saturée (précipitation): la quantité de polluant vers la nappe est fonction du volume de saumure polluée (et donc du volume de vides avant l'arrivée de la saumure) et non de la quantité de déchets (Arsenic, Cyanures)
  - Pour le Mercure et le Chrome, pas de saturation : quantité de polluants transférés à la nappe proportionnelle à la quantité de déchets et indépendante de la quantité de saumure polluée
  - Pour l'Antimoine : il subsiste une incertitude (comportement géochimique)
- **VARIABLES CLÉS : TONNAGE DÉCHETS, VOLUMES DE VIDES AVANT ARRIVÉE SAUMURE**
- **SCÉNARIO « BARRIÈRES TECHNIQUES » 7.000 M^3**

INERIS
maîtriser le risque
pour un développement durable

Barrières techniques ouvragées

Objectifs recherchés

1. Retarder l'intrusion de la saumure au sein du stockage
2. Limiter le volume des vides résiduels (donc de la saumure polluée)
3. Retarder l'expulsion de la saumure polluée vers le milieu naturel

Moyens techniques

1. Installation de bouchons très peu perméables en périphérie du stockage
2. Remplissage des vides résiduels intra-blocs (galeries)
3. Aménagement d'un écoulement privilégié au travers d'une ou plusieurs galeries parallèles au dépôt (court-circuit hydraulique)

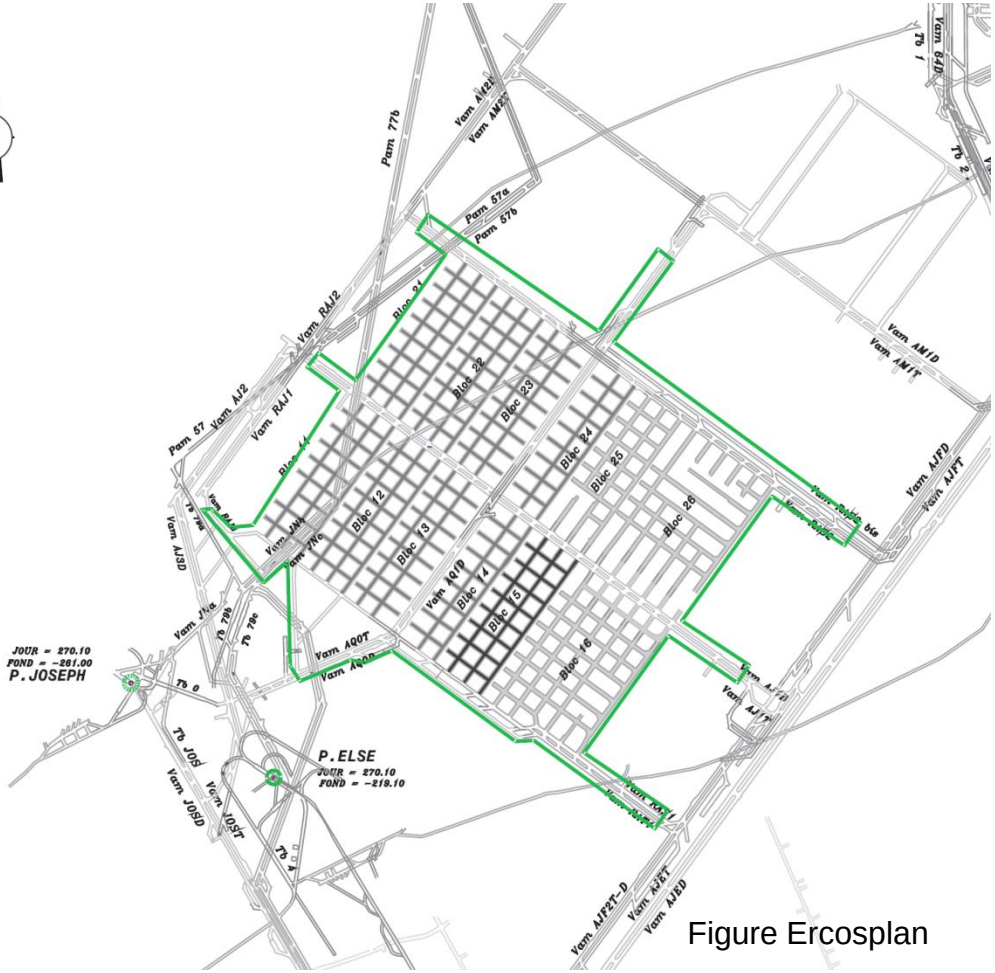
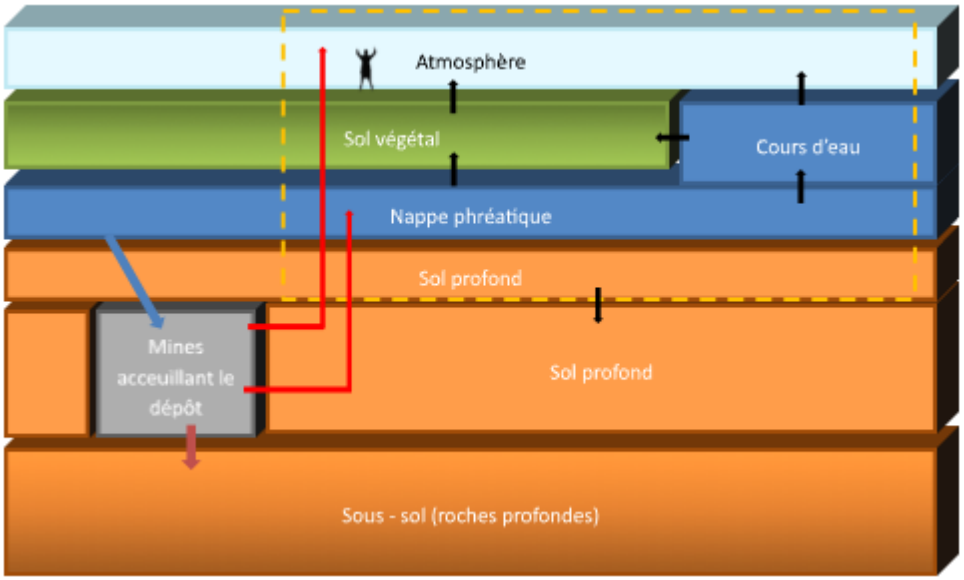


Figure Ercosplan

INERIS
maîtriser le risque
pour un développement durable

Scénarios STOCAMINE : description et facteurs clés (3)

- **EFFETS SUR LA SANTÉ ET L'ENVIRONNEMENT** (annexe 4)
  - Flux rouge et bleus : modélisés par INERIS
  - Flux en noir : modèle multimédia



- **MODÈLE D'IMPACT MULTIMEDIA IMPACT 2002**

  Le modèle combine des données :
  - de toxicité des substances
  - de transfert vers le milieu naturel
  - de mode d'exposition des populations

  HTTP://WWW.SPH.UMICH.EDU/RISKCENTER/JOLLIET/IMPACT2002+.HTM

  JOLLIET O, MARGNI M, CHARLES R, HUMBERT S, PAYET J, REBITZER G, ROSENBAUM R (2003): IMPACT 2002+: A NEW LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT METHODOLOGY. INT J LCA 8 (6) 324 – 330.

- Tableaux de l'OMS

  http://www.who.int/healthinfo/global_burden_disease/metrics_daly/en/

World Health Organization

INERIS
maîtriser le risque
pour un développement durable

Scénarios STOCAMINE : description et facteurs clés (4)

- Le modèle multimédia est utilisé également pour les scénarios Heilbronn
- Les DALY et PDF sont des unités de mesures des impacts sur la santé et sur l'environnement, cumulatifs sur le très long terme
- L'INERIS (en s'appuyant sur la modélisation hydrogéologique de la nappe d'Alsace par le BRGM) a évalué l'impact sanitaire de la consommation de l'eau de la nappe là où les seuils de potabilité ne seraient pas respectés. Ce mode d'exposition apporte une contribution marginale à l'impact total sur la santé sur le long terme, dont l'estimation prend en compte l'ensemble des modes d'exposition
- Approche valable uniquement pour la phase 1 : comparaison et hiérarchisation des scénarios. Impact sur la nappe phréatique nécessaire pour la phase 2 (hypothèse étude d'un scénario StocaMine)

INERIS
maîtriser le risque
pour un développement durable

Scénario : Déstockage et restockage à Heilbronn : description & facteurs clés (1)

- **DÉSTOCKAGE**
  - Nombre d'heures de travail prévues (données bureau d'études pour StocaMine)
  - Statistiques d'accidentologie (hors bloc 15 / données CdF et autres / données travail amiante incertaines)
  - => Estimation accidentologie transformée en DALY
- **TRANSPORT**
  - Transport par route retenu
  - Evaluation INERIS : probabilité accident / conséquence accident type : estimation en DALY et PDF des impacts sur la santé et l'environnement
- **FACTEURS CLÉS**
  - Nbre heures de travail (sauf bloc 15, données bureau d'études pour StocaMine), Distances de transport, densité de population au voisinage des routes
  - Impacts court terme uniquement pour le stockage et le transport / exclusivité des impacts court terme
- **INCERTITUDE : FORTE (FACTEUR 2 ?)**
  - Non acceptable si l'hypothèse d'Heilbronn maintenu sèche sur le très long terme est retenue
  - Acceptable dans le cas contraire

INERIS
maîtriser le risque
pour un développement durable

Scénario : Déstockage et restockage à Heilbronn : description & facteurs clés (2)

- **HEILBRONN**
  - Déchets totaux > 1 MT (apport StocaMine marginal de 4 % maxi)
  - Hypothèse « forte » INERIS : déchets alcalins (données réelles non obtenues)

- **SCÉNARIO « DOSSIER D'AUTORISATION HEILBRONN »**
  - Cavité sèche « *ad vitam aeternam* »
  - Pas d'impact long terme
  - Seul impact du scénario : impacts court terme des phases de déstockage + transport

- **SCÉNARIO COMPLÉMENTAIRE ÉTUDIÉ PAR L'INERIS**
  - Identique à StocaMine (sans barrières) : différence notable : pas de fluage avant arrivée de saumure du fait du mode d'exploitation et profondeur
  - Flux polluants vers nappes : 4 % de l'apport lié à 1 040 000 t de déchets avec 20 m^3 de vide par t de déchets

- **CHOIX DU SCÉNARIO « HEILBRONN »** DÉTERMINANT

INERIS
maîtriser le risque
pour un développement durable

Autres scénarios

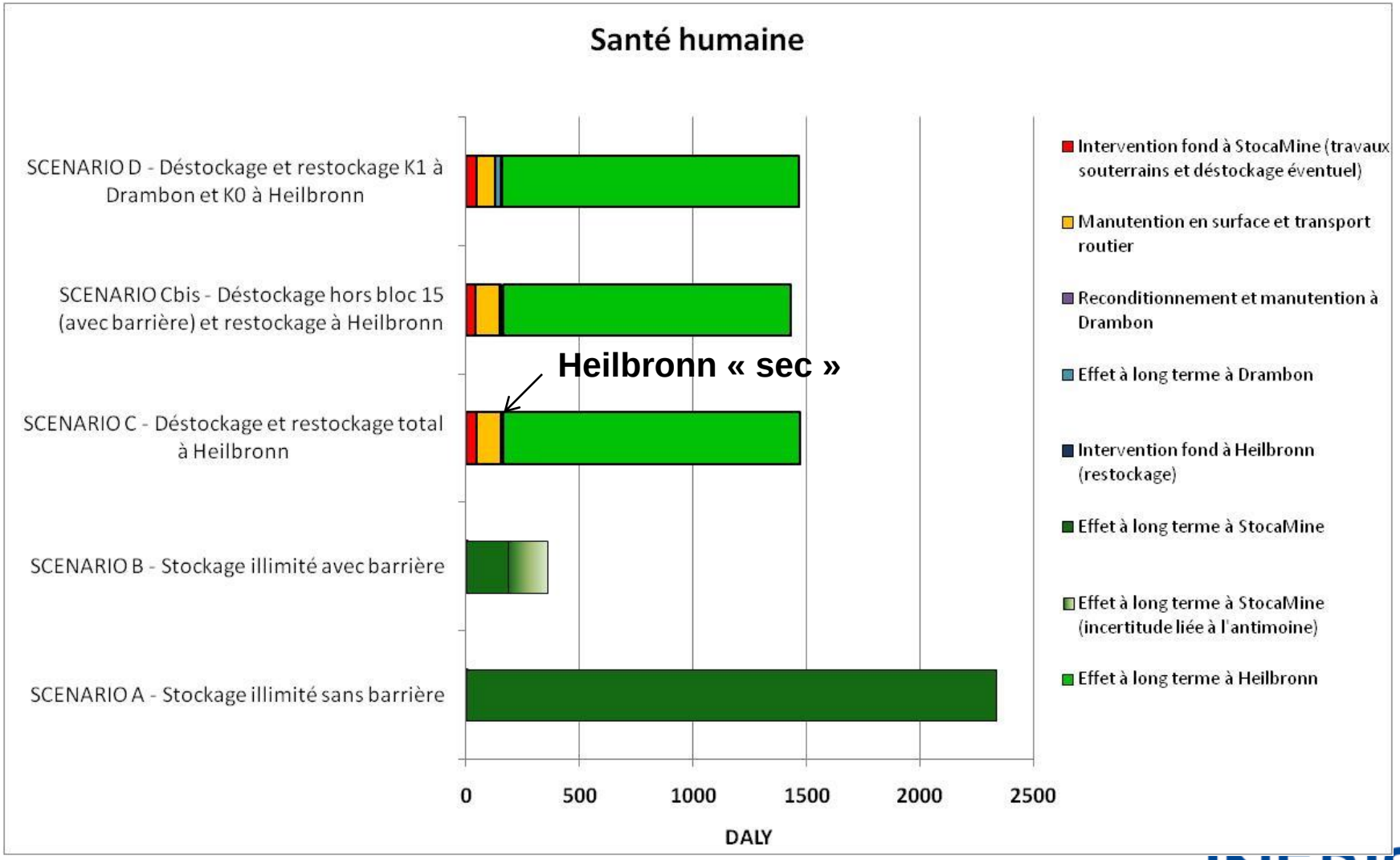
- **Scénario mixte K1 + K0**
  - 22 000 t de déchets K0 vers Heilbronn
  - 22 000 t de déchets K1 vers Drambon
  - 100 % des polluants « dimensionnants » relèvent de la K0 & impact des K1 à Drambon marginal !

- **Scénario Bloc 15 laissé à StocaMine + autres déchets a Heilbronn**
  - Pas de gain sur impacts/risques déstockage car déstockage bloc 15 non spécifiquement modélisé (et sans doute très sous-estimé) dans scénario déstockage-restockage Heilbronn précédent
  - Modèles StocaMine avec barrières techniques et Heilbronn appliqués pour impacts santé et environnement long terme

INERIS
maîtriser le risque
pour un développement durable

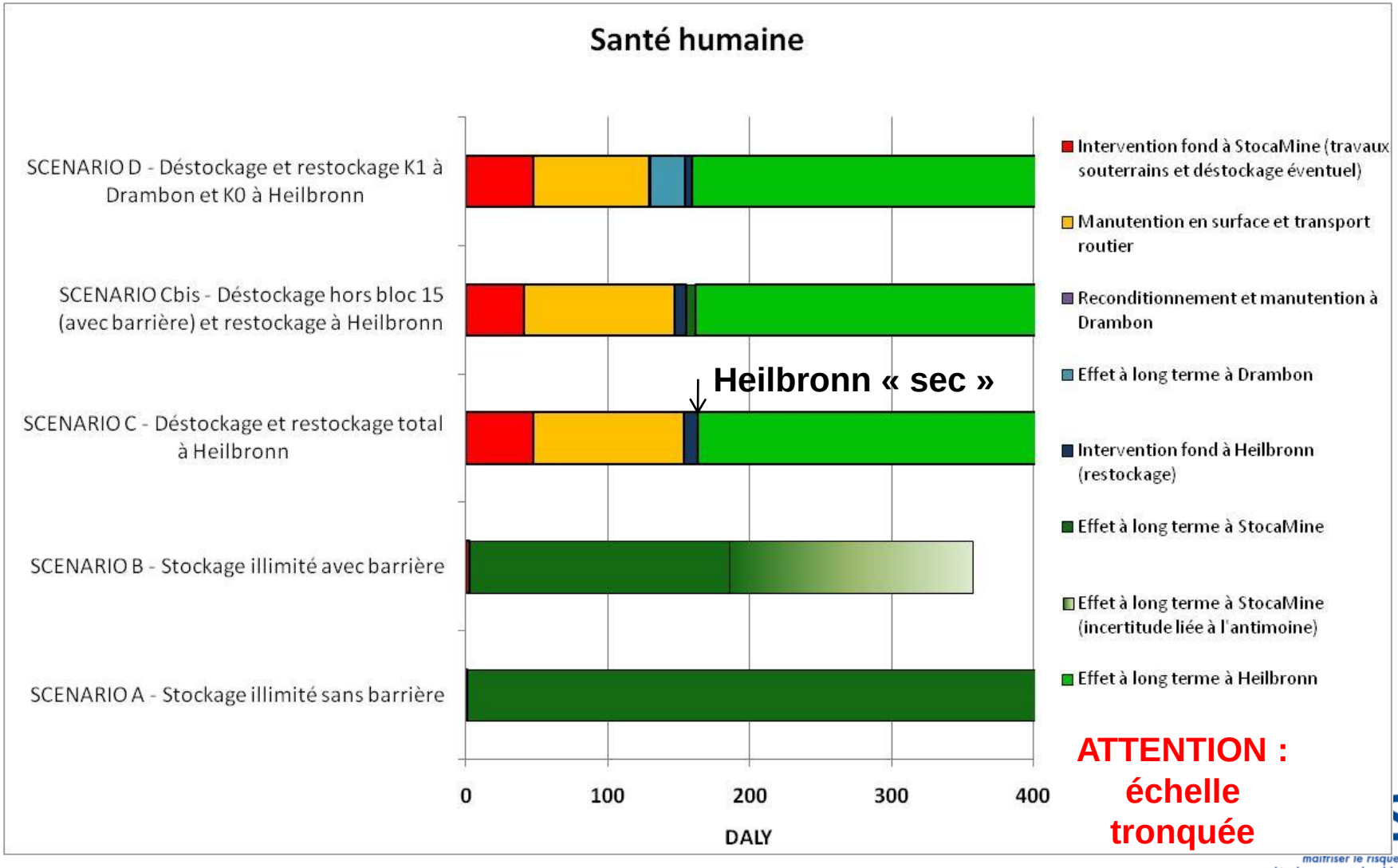
RÉSULTATS

Comparaison des scénarios – impact sanitaire



INERIS
maîtriser le risque
pour un développement durable

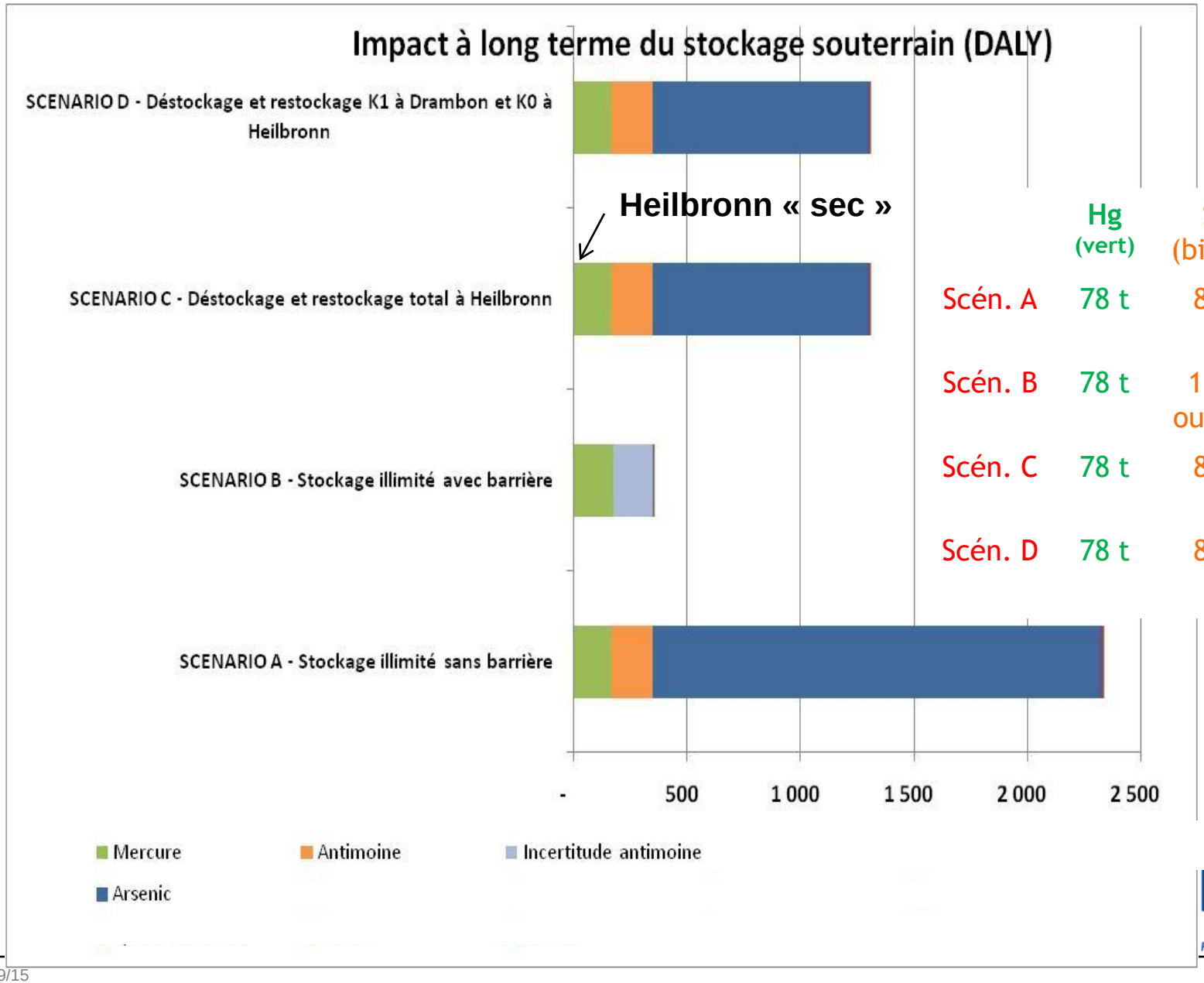
Comparaison des scénarios – impact sanitaire (zoom)



ATTENTION : échelle tronquée

maîtriser le risque
pour un développement durable

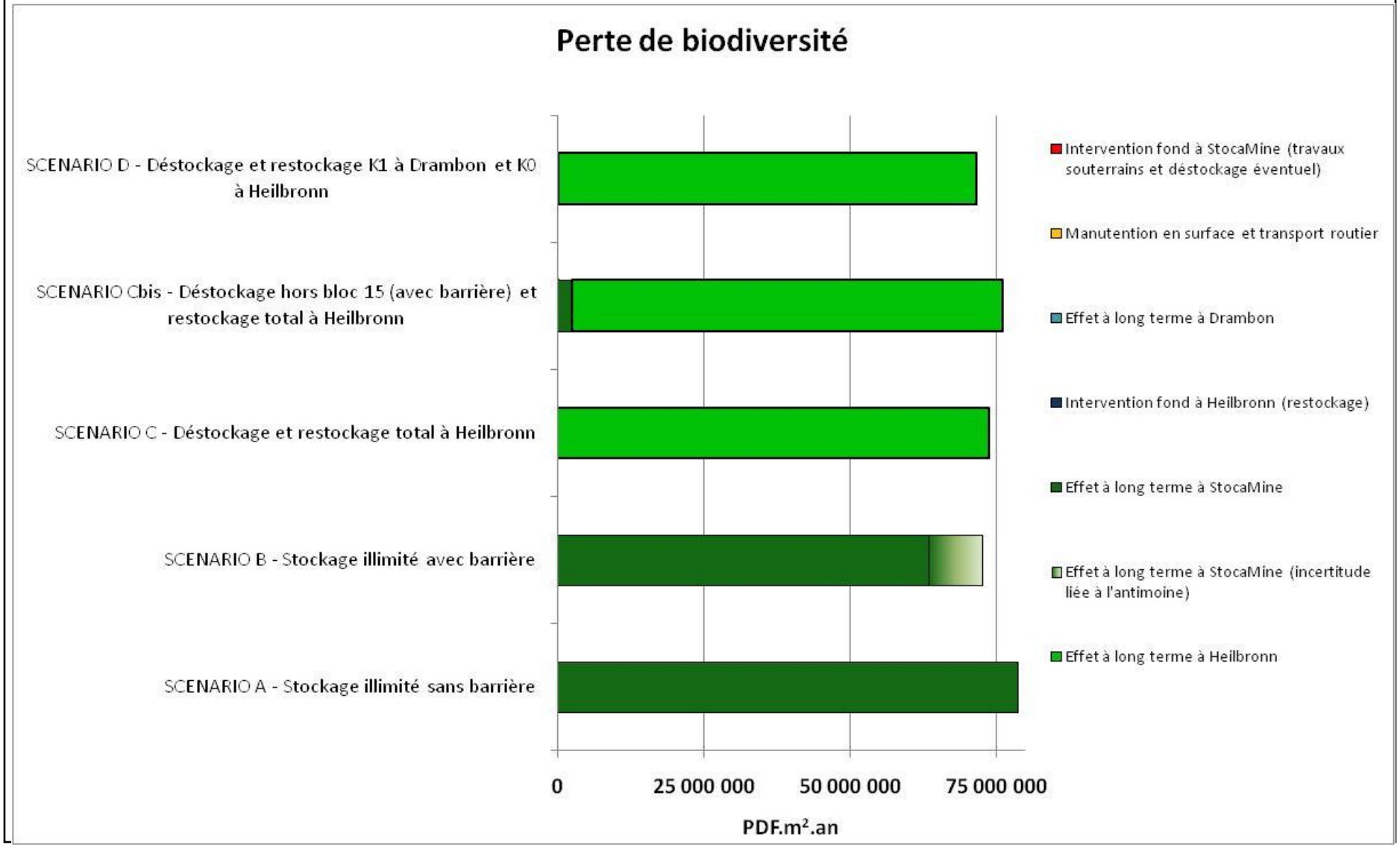
Contribution des substances sur l'impact sanitaire à long terme



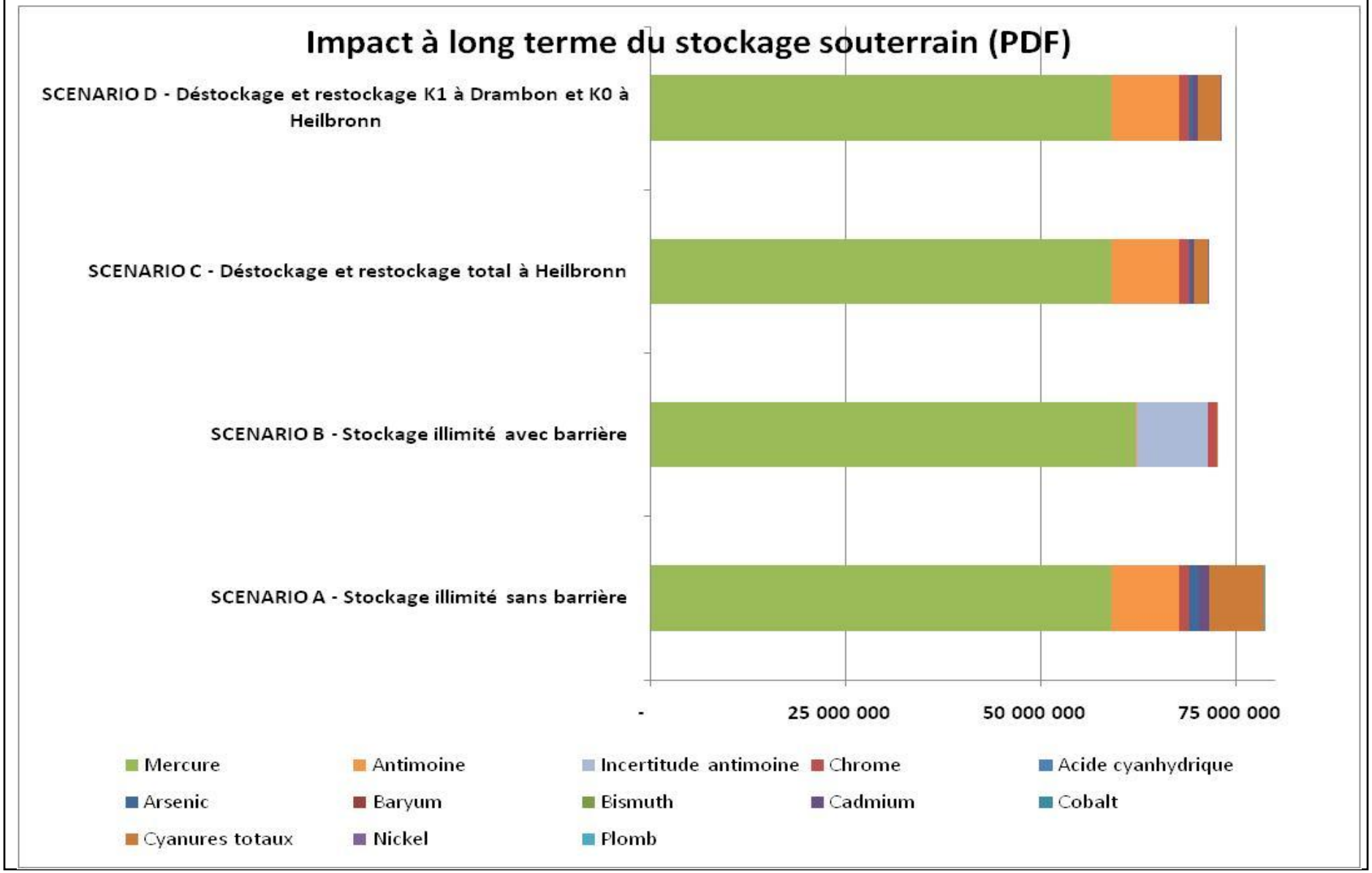
	Hg (vert)	Sb (bistre)	As (bleu)
Scén. A	78 t	83 t	62 t
Scén. B	78 t	1,3 t ou 83 t	182 kg
Scén. C	78 t	83 t	30 t
Scén. D	78 t	83 t	30 t

NERIS
maîtriser le risque pour un développement durable

Comparaison des scénarios – Impact sur la biodiversité



Contribution des substances à l'impact à long terme sur la biodiversité



Analyse préliminaire

- L'impact sur l'environnement / biodiversité (Potentially Disappeared Function - PDF) est lié au mercure majoritairement. Le mercure ne précipite pas : pas de modification des quantités apportées aux nappes phréatiques sur le très long terme quel que soit le scénario étudié (sauf Heilbronn « sec »)

- Heilbronn « Sec » et StocaMine « avec barrières » sont comparables (même ordre de grandeur si l'antimoine précipite / facteur 2 si l'antimoine ne précipite pas). Attention : risque de destockage du bloc 15 sous-estimé => Même ordre de grandeur compte tenu des incertitudes

- StocaMine avec barrières : scénario à privilégier pour impacts à court et long termes si le scénario « Heilbronn Sec » n'apparaît pas raisonnablement pertinent au Copil

- Scénario « privilégié » ne signifie pas figé et non améliorable : c'est l'objectif de la phase 2

INERIS
maîtriser le risque
pour un développement durable

Points fondamentaux

1. **Le résultat de la comparaison dépend de la réponse à la question : *quel est le scénario le plus réaliste pour Heilbronn à long terme (plusieurs milliers d'années) : mine sèche ou intrusion de saumure (et son expulsion)* ?**

2. **L'efficacité des barrières envisagées à StocaMine pour limiter à environ 7000 m³ le volume de saumure polluée expulsée vers l'environnement devra faire l'objet d'une attention particulière lors de la phase 2.**

INERIS
maîtriser le risque
pour un développement durable

ANNEXE 1 : masses des substances retenues pour l'étude

Eléments	Quantité (tonnes)
As	1231
Ba	257
Cd	32
Cr total	51
Cu	89
Hg	78
Mo	15
Ni	39
Pb	231
Sb	83
Se	3
Zn	296
Cyanures libres	5
TOTAL	2410

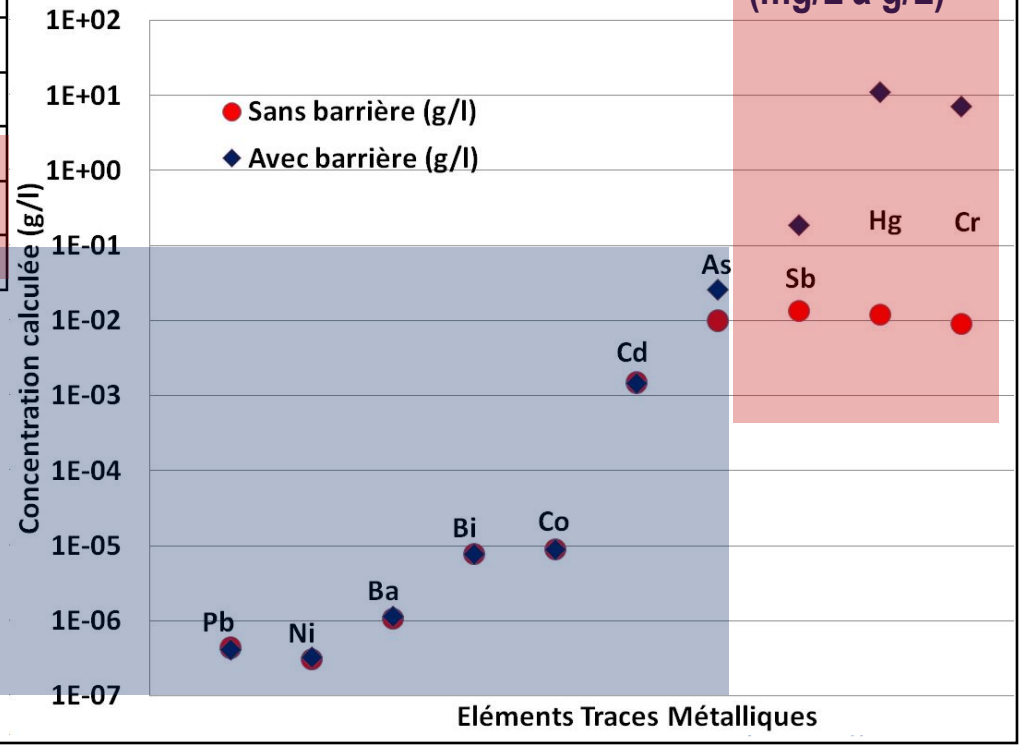
INERIS
maîtriser le risque
pour un développement durable

ANNEXE 2 : concentrations en substances prises en compte (cf. étude géochimique de l'INERIS)

Elément	Concentration (g/L) Sans barrières (6 200 000 m³)	Avec barrières (7 000 m³)
Ni	3.05E-07	3.23E-07
Pb	4.35E-07	4.08E-07
Ba	1.06E-06	1.13E-06
Bi	7.69E-06	7.69E-06
Co	8.85E-06	8.85E-06
Cd	0.00150	0.00146
As	0.0100	0.026
Sb	0.0134	0.189
Cr	0.0091	7.23
Hg	0.0120	11.2

Contrôle par des minéraux insolubles (hydroxydes…) (~µg/L)

Effets des complexants (CN^-, Cl^-) ou éléments sous forme anionique (mg/L à g/L)



ANNEXE 3 : Scénarios étudiés (cf. étude hydrogéologique)

① Hypothèse sans barrière

- Dilution dans le volume d'eau situé au-dessus du stockage : 6,2 Mm^3
- Expulsion de saumure contaminée par les 5 puits amont* au débit de l'ordre de 600 m^3/an

② Hypothèse avec barrières

- Expulsion de saumure contaminée par les déchets contenus par une barrière ouvragée
- Volume d'eau contenu dans les déchets : 7 000 m^3

$$\left(\frac{44\,000 \text{ t de déchets}}{\text{densité } 2} = 22\,000 \text{ m}^3 \times \text{porosité } 0,33 = \text{volume } 7\,000 \text{ m}^3 \right)$$

- Expulsion de saumure contaminée par les 5 puits amont* au débit de 0,7 m^3/an

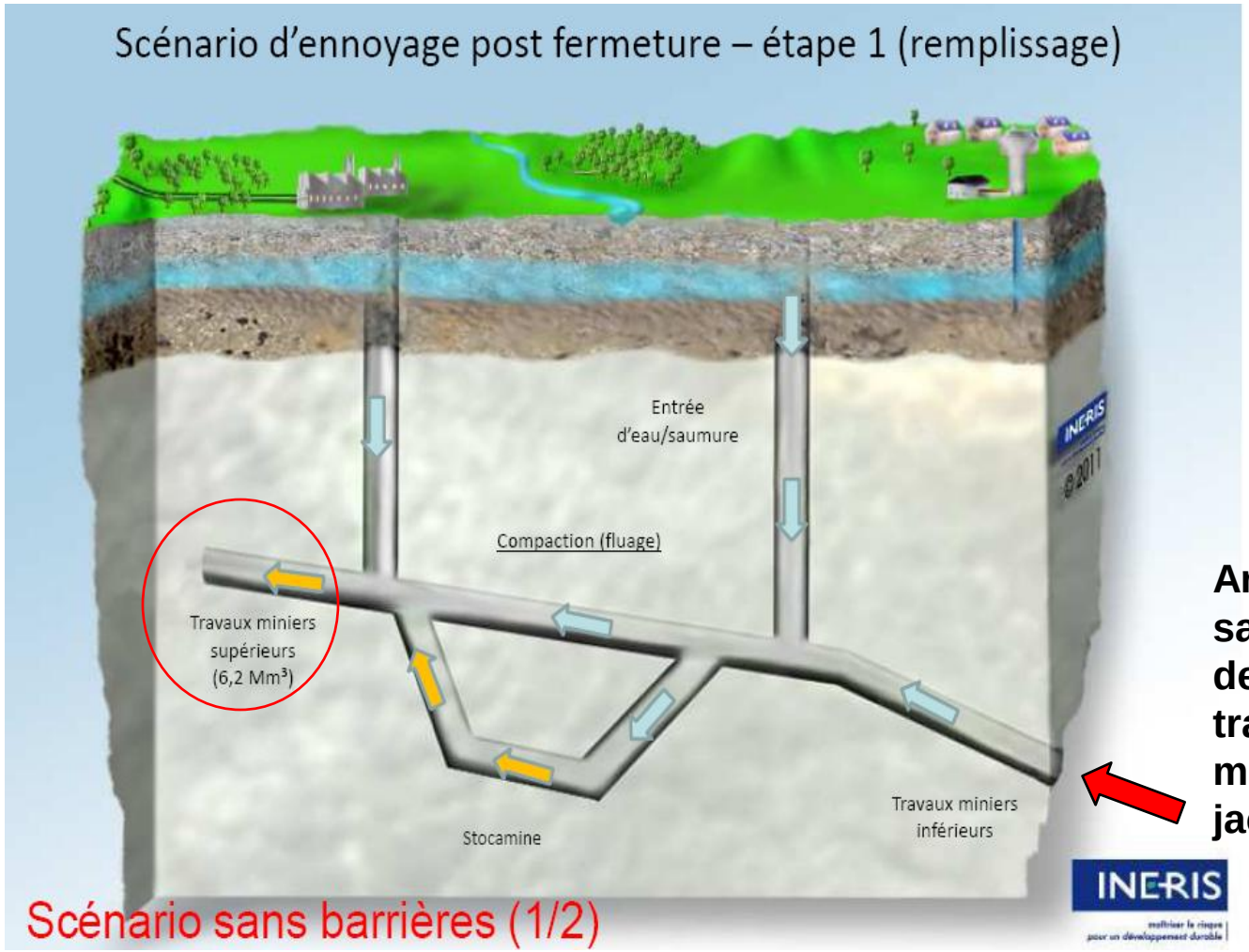
(sous l'effet d'une vitesse de convergence des galeries fermées ennoyées du stockage de 0,01% / an)

** Joseph, Else, Amélie 1, Amélie 2, Max*

INERIS
maîtriser le risque
pour un développement durable

ANNEXE 3 : Scénario d'ennoyage sans barrière (1/2)

Schéma de principe : ① Remplissage

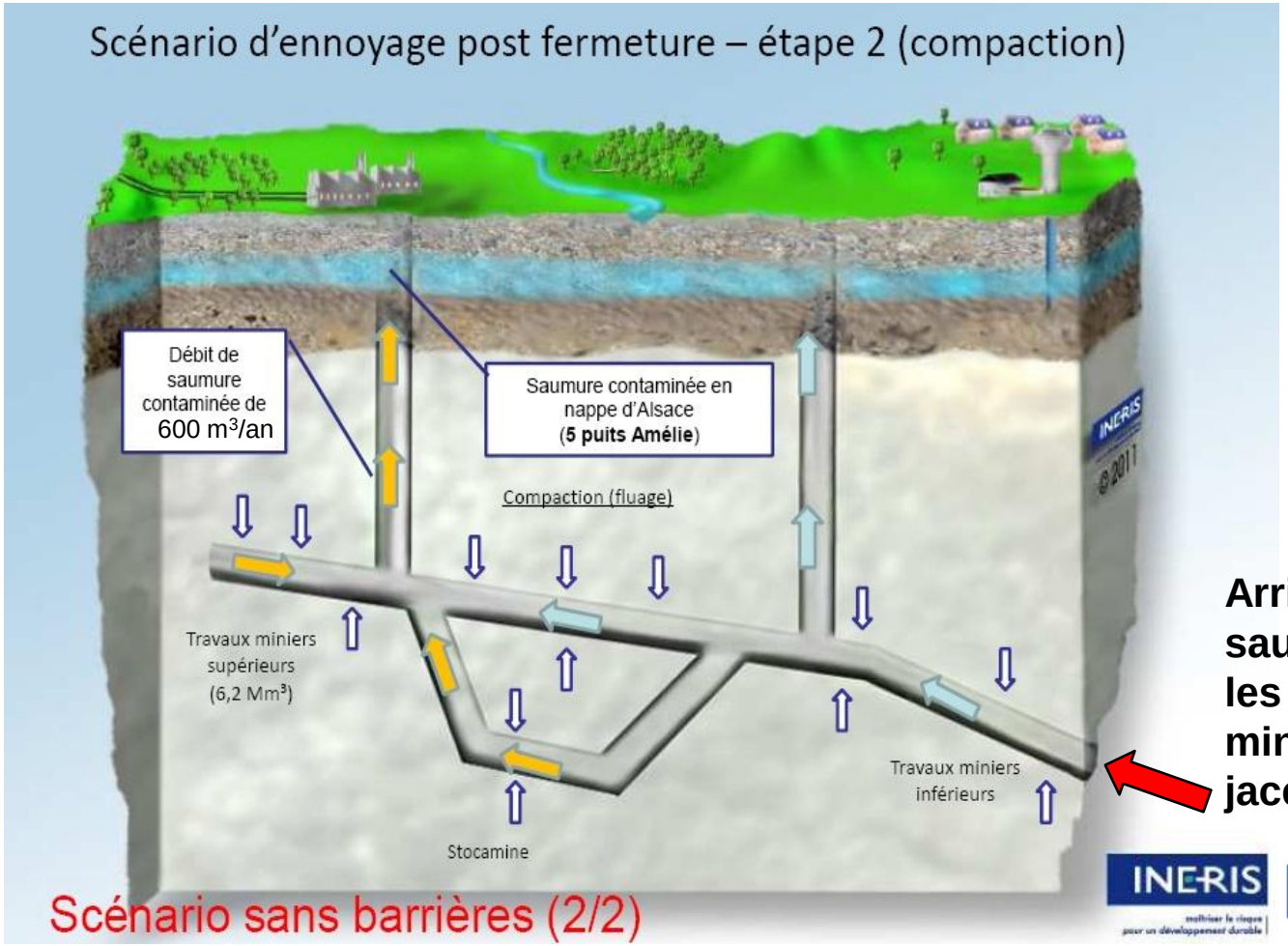


Arrivée de la saumure depuis les travaux miniers sous-jacents

INERIS maîtriser le risque pour un développement durable

ANNEXE 3 : Scénario d'ennoyage sans barrières (2/2)

Schéma de principe : ② Fluage / Compaction du foudroyage

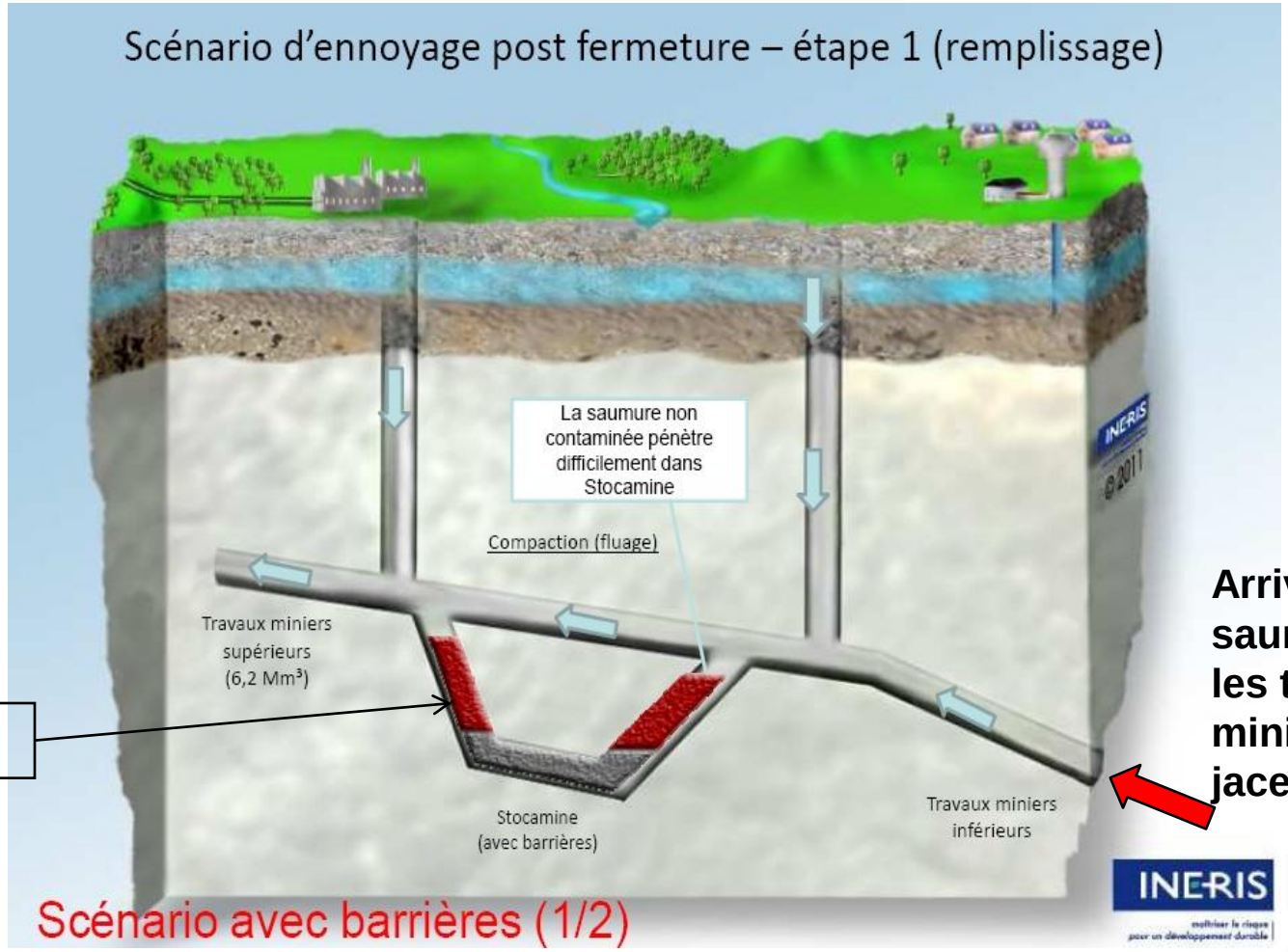


Arrivée de la saumure depuis les travaux miniers sous-jacents

INERIS maîtriser le risque pour un développement durable

ANNEXE 3 : Scénario d'ennoyage avec barrières (1/2)

Schéma de principe : ① Remplissage

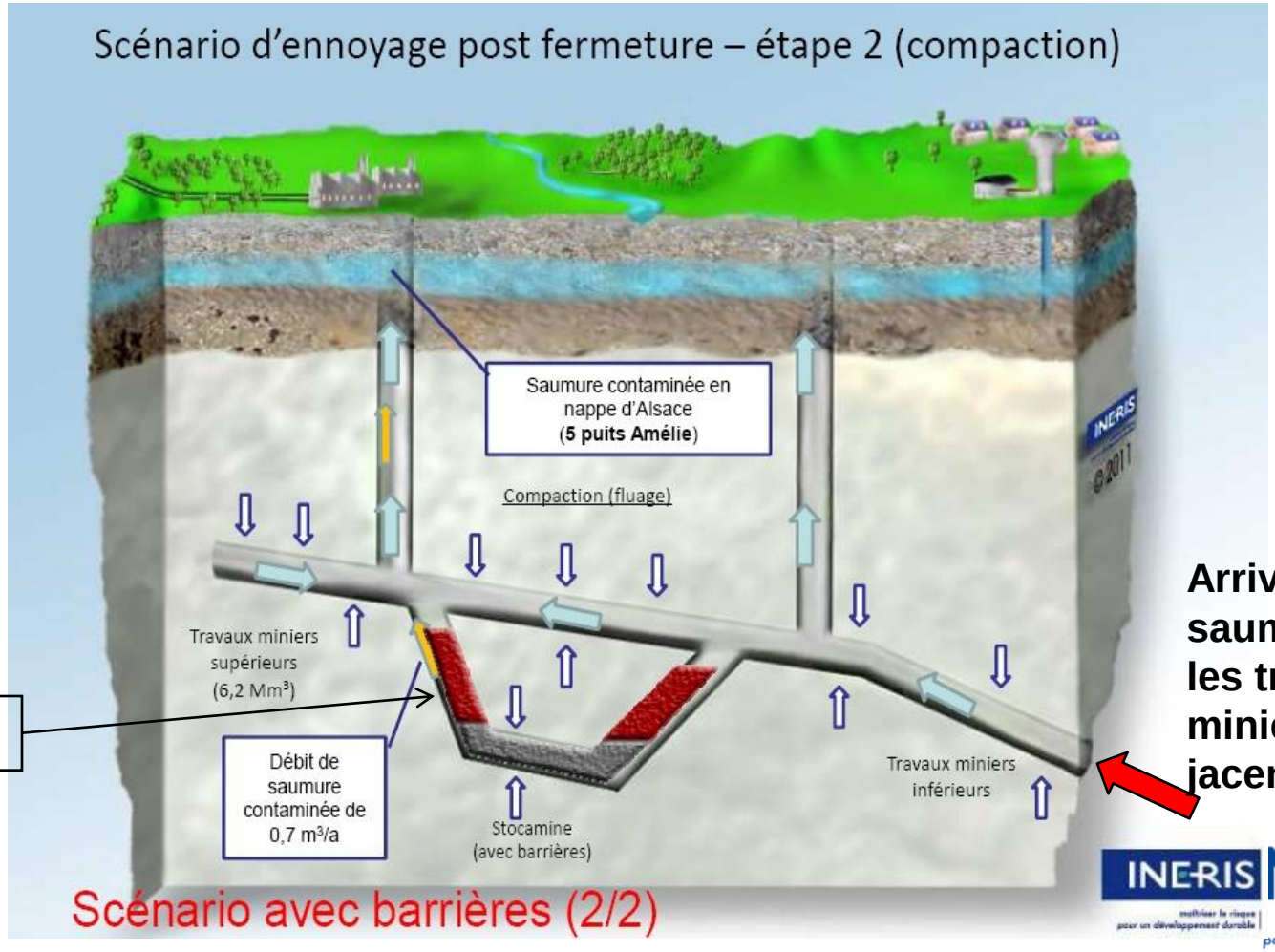


barrières

Arrivée de la saumure depuis les travaux miniers sous-jacents

ANNEXE 3 : Scénario d'ennoyage avec barrières (2/2)

Schéma de principe : ② Compaction / Compaction du foudroyage



barrières

Arrivée de la saumure depuis les travaux miniers sous-jacents

INERIS maîtriser le risque pour un développement durable

ANNEXE 4 : Description de l'impact sur la santé humaine - Indicateur DALY

Toxicité humaine

Les facteurs de dommages sur la santé humaine sont déterminés à partir du modèle IMPACT 2002+ qui procure des facteurs de caractérisation par défaut (risques et impacts potentiels par unité de masse émise) pour 1000 substances chimiques.

Les facteurs de caractérisation tiennent compte :

- Du **devenir de la substance**, qui inclut son transport dans l'espace entre les différents milieux
- De **l'exposition humaine** associée à la production de nourriture, à l'approvisionnement en eau et à l'inhalation
- Du **potentiel de risque** sur la santé humaine pour les affections cancérigènes ou non cancérigènes, c'est-à-dire le nombre de cas probables (mortalité, maladie) par kg de substance ingérée dans la population. Cette grandeur se base soit sur des études épidémiologiques, ou plus souvent sur des essais chroniques effectués sur des rongeurs. IMPACT 2002+ détermine les valeurs les plus probables, contrairement aux grandeurs utilisées en évaluation des risques qui font intervenir des coefficients de sécurité afin de ne pas dépasser certains niveaux de risque.
- De la **gravité** de ces maladies, c'est-à-dire la sévérité de l'effet (maladie, mortalité) sur la santé humaine. Le facteur de gravité est exprimé en année équivalente de vie perdue par cas de maladie (DALY/cas) tels qu'utilisés par l'Organisation Mondiale de la Santé.

Facteur de devenir x Facteur d'exposition = Fraction ingérée (en kg $_{\text{ingéré}}$/ kg $_{\text{émis}}$)

Potentiel de risque x Gravité = Facteur d'effet (DALY/kg $_{\text{ingéré}}$)

Les **facteurs de caractérisation** des dommages permettent ensuite de passer des kg de substance équivalente aux années équivalentes de vie perdues (DALY), unité d'expression des dommages sur la santé humaine.

(Source : « Introduction à l'ACV » -V. Cloup et J. Payet - Maison de l'Ecologie – Lyon - 14 mars 2007)

INERIS maîtriser le risque pour un développement durable