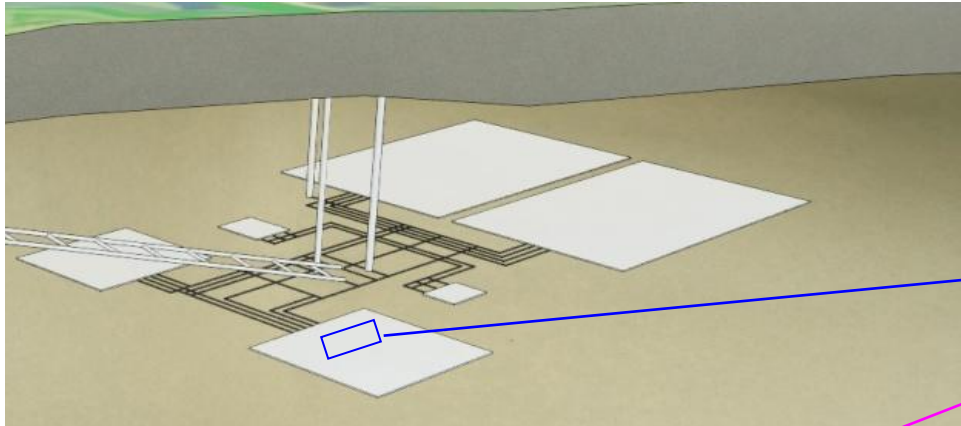


Evaluation en phase d'exploitation réversible du risque ATEX dans des alvéoles de stockage

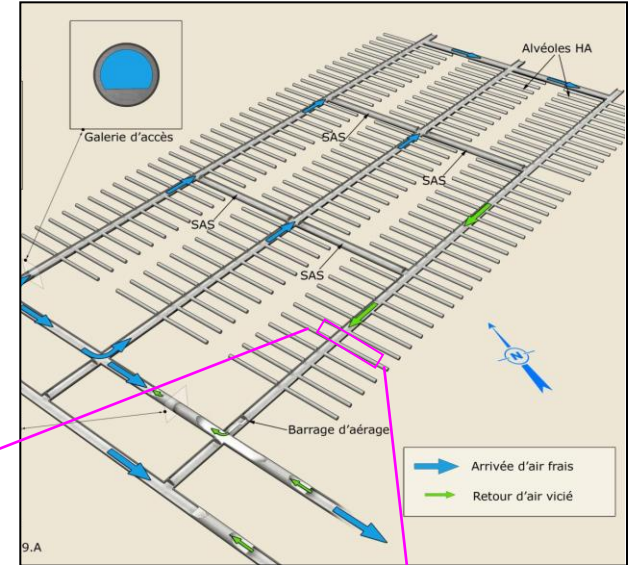
A.Goudard, C.Bouillet, L-V.Bénet
Analyse Mécanique des Equipements SOCOTEC

ETUDE DU RISQUE ATEX SUR UNE ARCHITECTURE POSSIBLE DU STOCKAGE

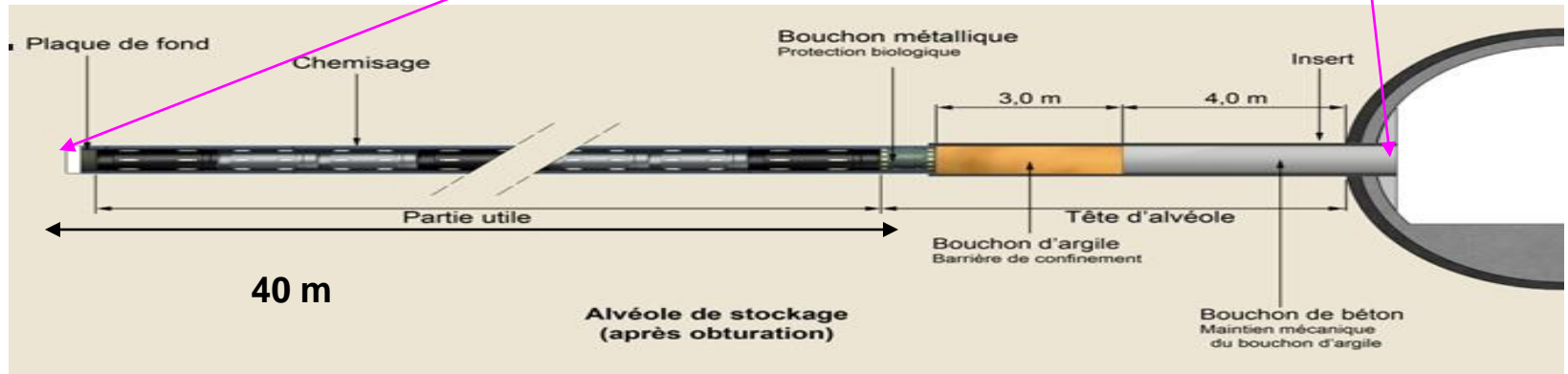
STOCKAGE GEOLOGIQUE DE DECHETS RADIOACTIFS



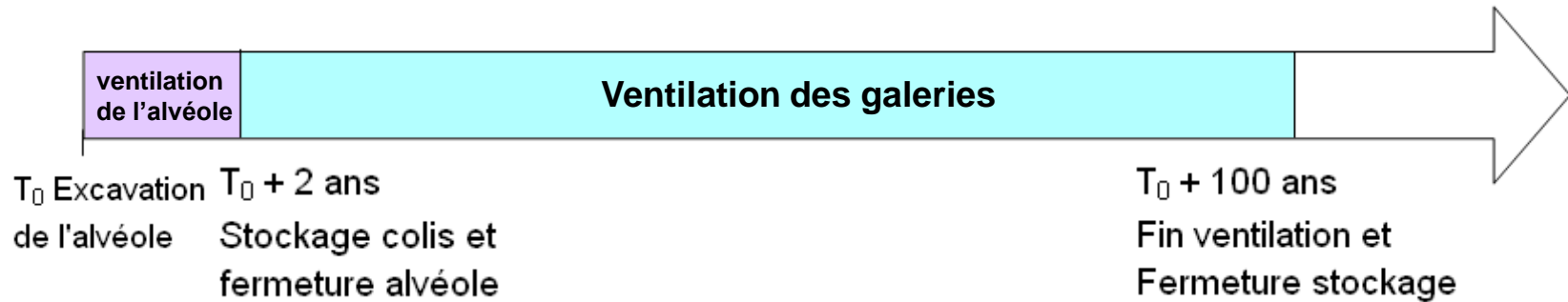
MODULE HA (HAUTE ACTIVITE)



ALVEOLE HA



Chronologie de l'évolution du stockage



Ventilation → arrivée d'O₂

Les déchets et les composants de l'alvéole contiennent une importante quantité d'acier (chemisage, insert, fûts,...)

Corrosion des aciers → production d'H₂

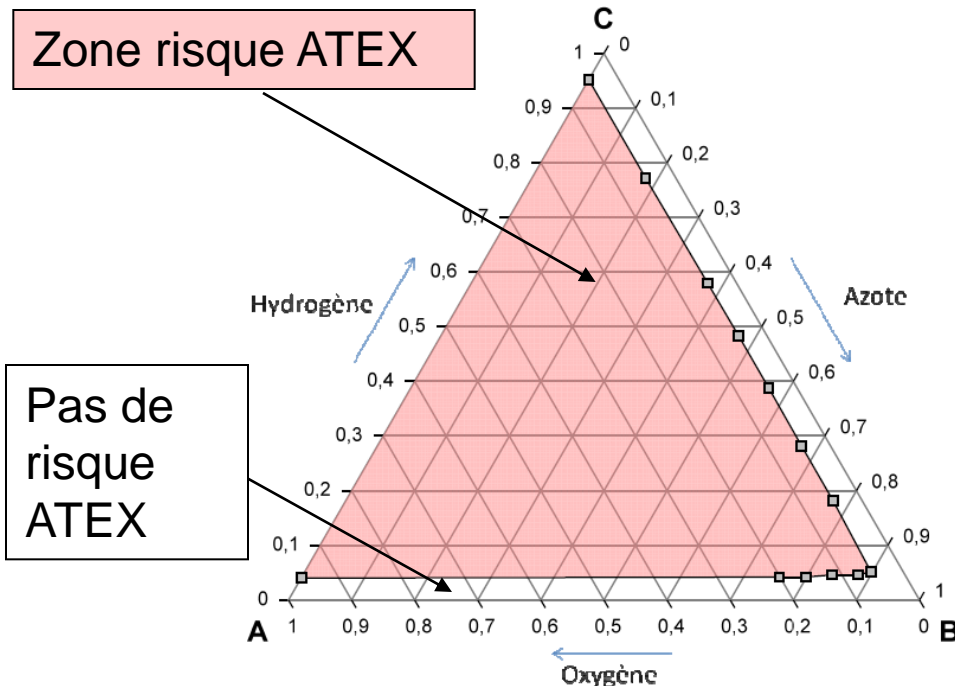
Risque d'ATmosphère EXplosive (ATEX)

Plan de l'exposé

1. La problématique physique
2. Les phénomènes modélisés (les lois de comportement)
3. La résolution du problème dans Cast3M (aspect informatique et numérique)
4. Cas de référence
 1. Les modèles 3D et 2D axisymétrique
 2. Le transitoire thermique
 3. Le transitoire hydro-gaz
 4. Les zones de production de H_2 et de consommation de O_2
 5. Les concentrations d' H_2 et d' O_2
 6. Le risque ATEX
5. Cas de sensibilité
6. Conclusions

Définition du risque ATEX :

- **ATEX : ATmosphère EXplosive**
- **Présence d'hydrogène (corrosion) + oxygène (ventilation) avec azote**
- **Risque ATEX dans les jeux ou dans les vides (si fermeture sans scellements)**
- **Pas de risque dans les milieux poreux**



Détermination de l'explosivité du mélange

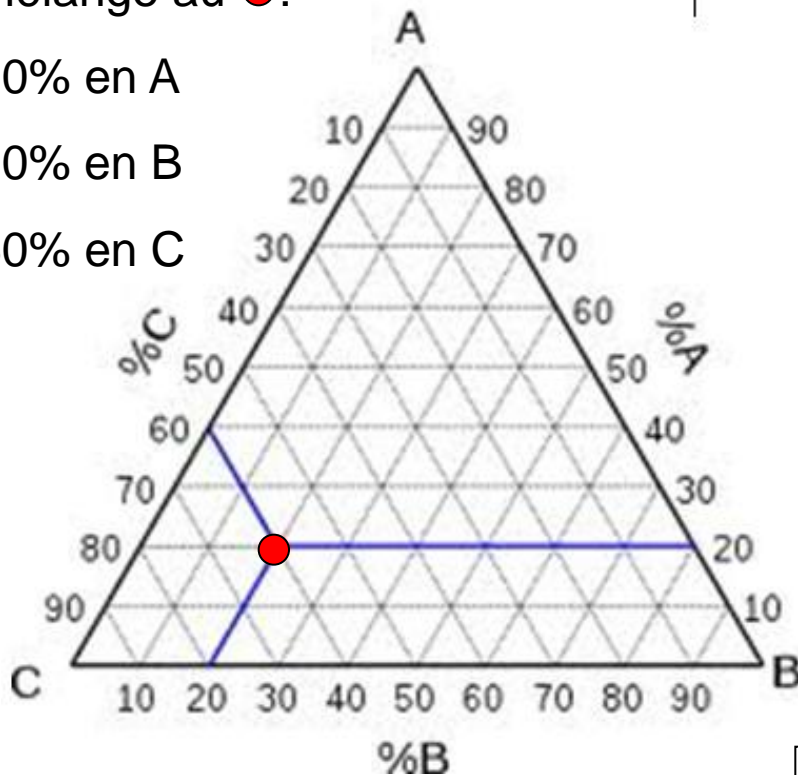
Diagramme ternaire (présence d'azote)

La composition du mélange au ● :

20% en A

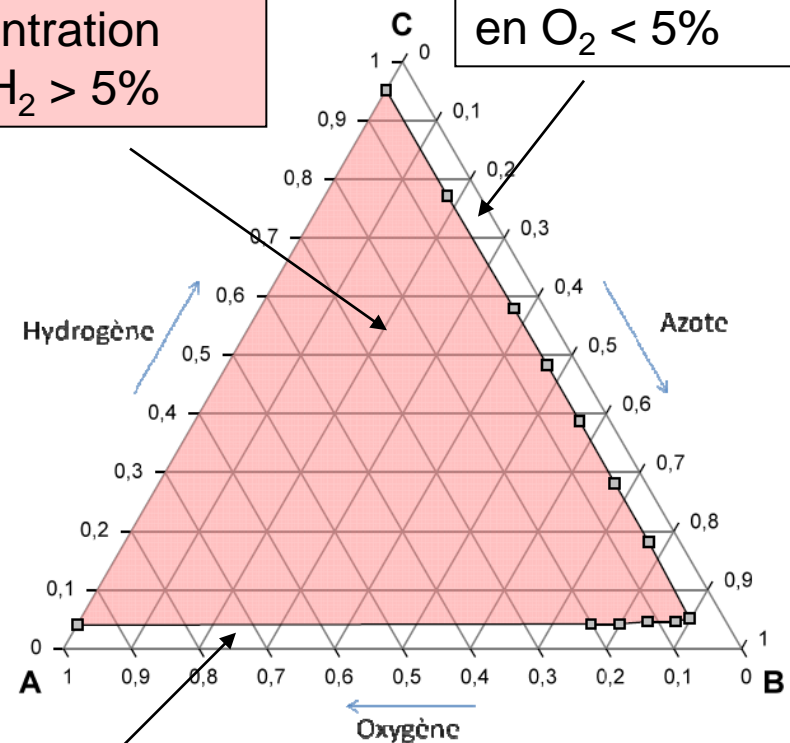
20% en B

60% en C



Concentration O_2 et $H_2 > 5\%$

Concentration en $O_2 < 5\%$



Concentration en $H_2 < 5\%$

Remarque : Energie nécessaire au déclenchement de l'explosion plus importante en bordure de la zone rose qu'au cœur de la zone rose

Bilans de masse considérés :

- **Conservation de l'eau dans le milieu poreux**
- **Conservation du gaz exprimé**
- **Conservation du gaz dissous dans la phase aqueuse**
- **Conservation oxygène (gazeux et dissous)**
- **Conservation hydrogène (gazeux et dissous)**
- **Conservation de la chaleur**

➔ **Conservation de l'azote = par consistance du système**

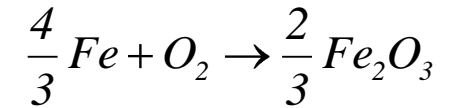
Lois de comportement

La loi de Darcy :	écoulement du gaz et de l' eau au sein du milieu poreux
Loi de capillarité :	saturation en eau fonction de la pression capillaire
Le modèle de Van Genuchten :	perméabilité relative fonction de saturation en eau
La loi de Henry :	dissolution du gaz dans l' eau
La loi de Kelvin :	vapeur saturante en milieu poreux
La loi de Fick :	diffusion massique
La loi de Stokes-Einstein :	diffusivité en fonction de la température

Consommation de l'oxygène

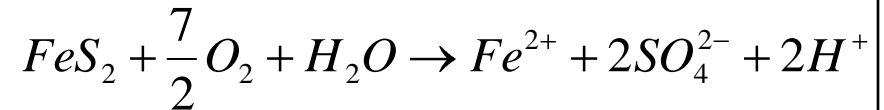
Corrosion des aciers :

- Vitesse selon type d'acier et milieu réducteur/oxydant



Réaction avec la pyrite des argilites :

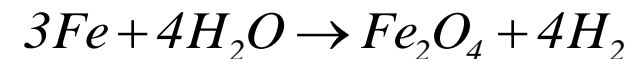
- Vitesse fonction de O_2



Production de l'hydrogène et consommation d'eau

Production d'hydrogène 2 conditions :

- $O_2 < 1\%$
- Saturation en eau $> 20\%$

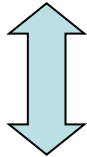


Seuils définis phénoménologiquement (pas forcément enveloppe)

Module de résolution : modèle couplex gaz + développement au fil des études

Module diphasique 2D(2007)

- Résolution **Elément Finie Mixte**
- Implication directe du couplage [Pw,Uw,Pg,Jg]
- Discrétisation EQEX, KMAB, KMCT variable [Pw, Uw, Pg, Jg]
- physique Couplex-Gaz + effets thermiques
- 10 000 éléments en 2D



Transport d'espèces gazeuses (2010-11)

- Résolution Elément Finie
- couplage bilatéral faible
- Discrétisation EQEX, LAPN, KONV...
- transport diffusif convectif eau + gas



Module diphasique 3D (2010)

- Résolution **Elément Finie** linéaire
- Couplage itératif (Picard) de [Pw] et [Pg]
- accélérateur de convergence
- Discrétisation EQEX, LAPN...
- Solveur itératif BiCGstab
- physique Couplex-Gaz + thermique
- 50 000 éléments en 3D

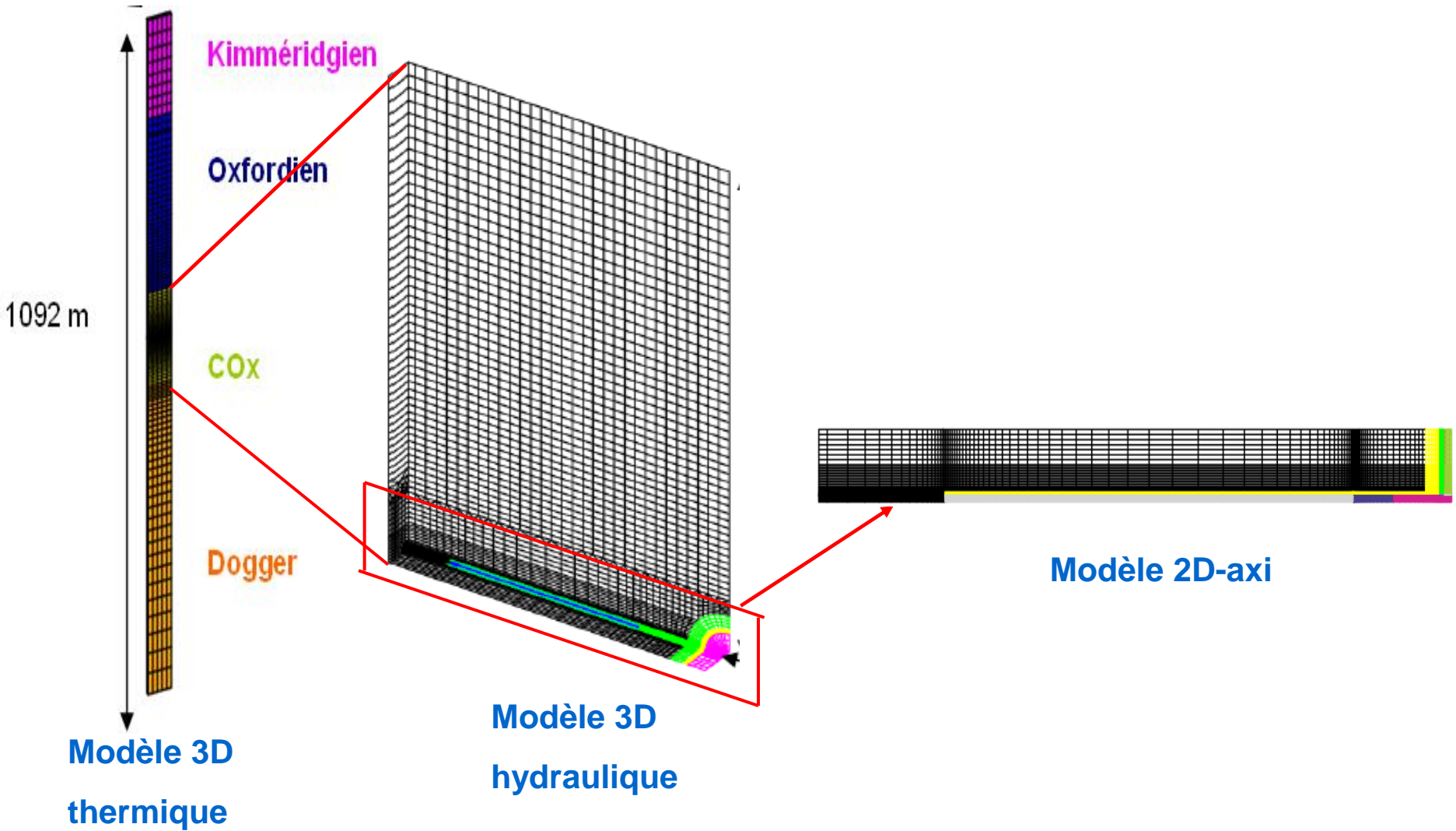


modèle 3D

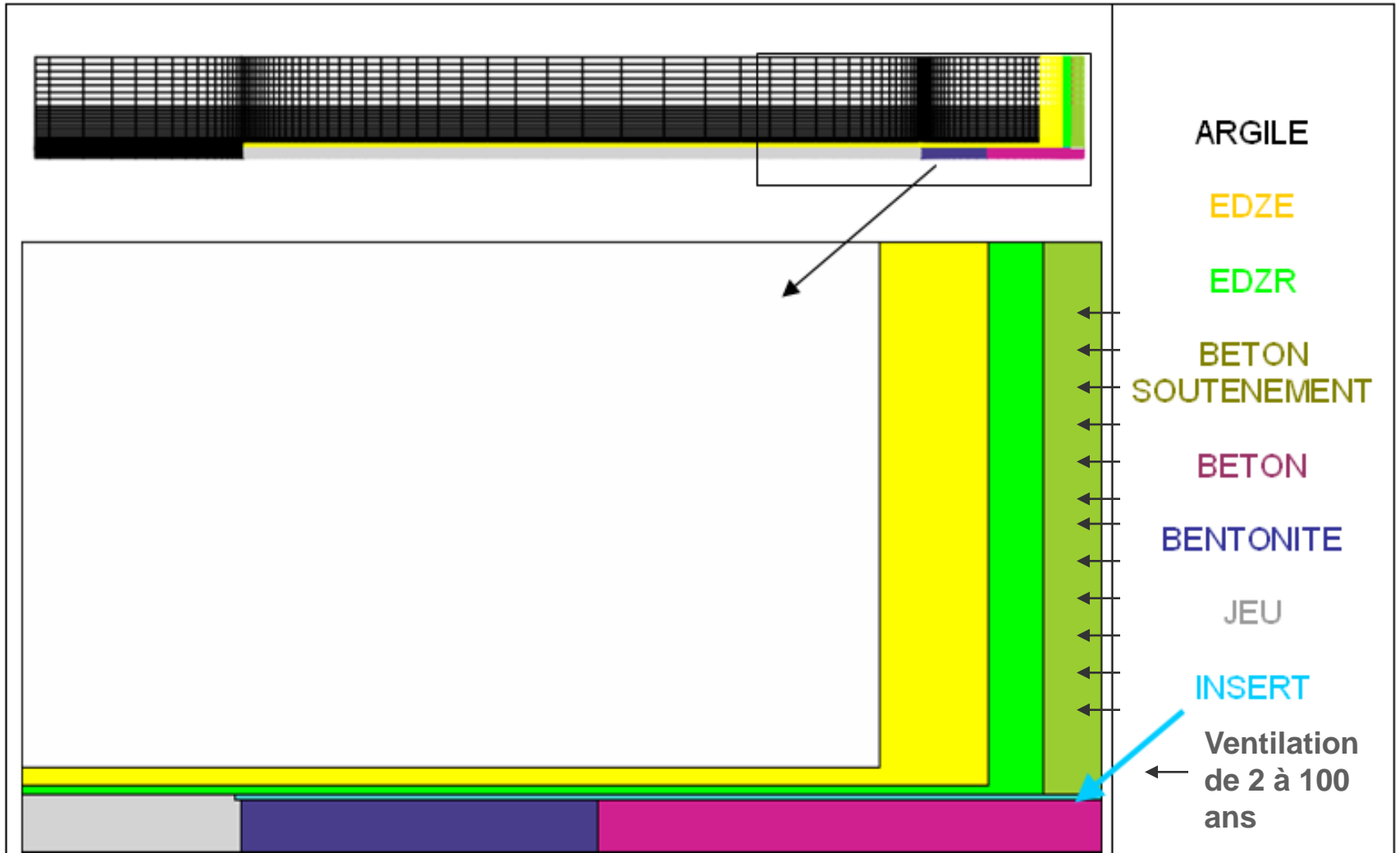
$P_w(t,x)$ et $T(t,x,r)$ avec $z=r=6m$

modèle 2Daxi thermo-hydro-gas + transport O_2, H_2

Cas de référence : Les modèles 3D et 2Daxisymétrique



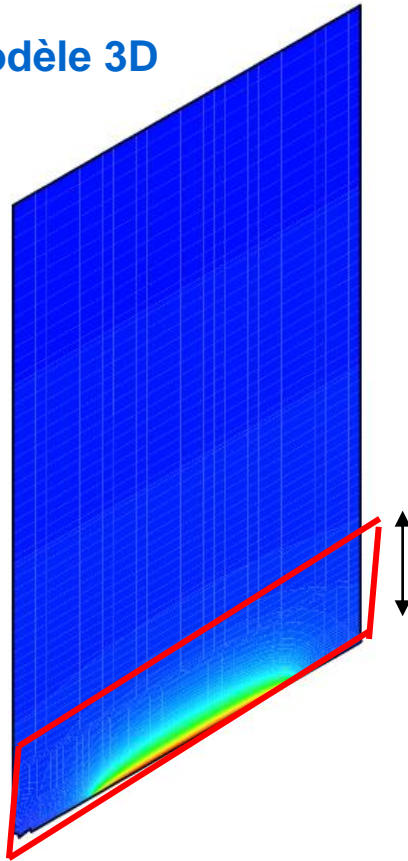
Cas de référence : Les modèles 3D et 2Daxisymétrique



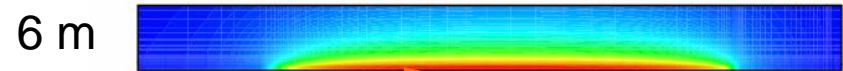
Modèle 2D-axi

Cas de référence : Les modèles 3D et 2D axisymétrique

Modèle 3D



Modèle 2D axi



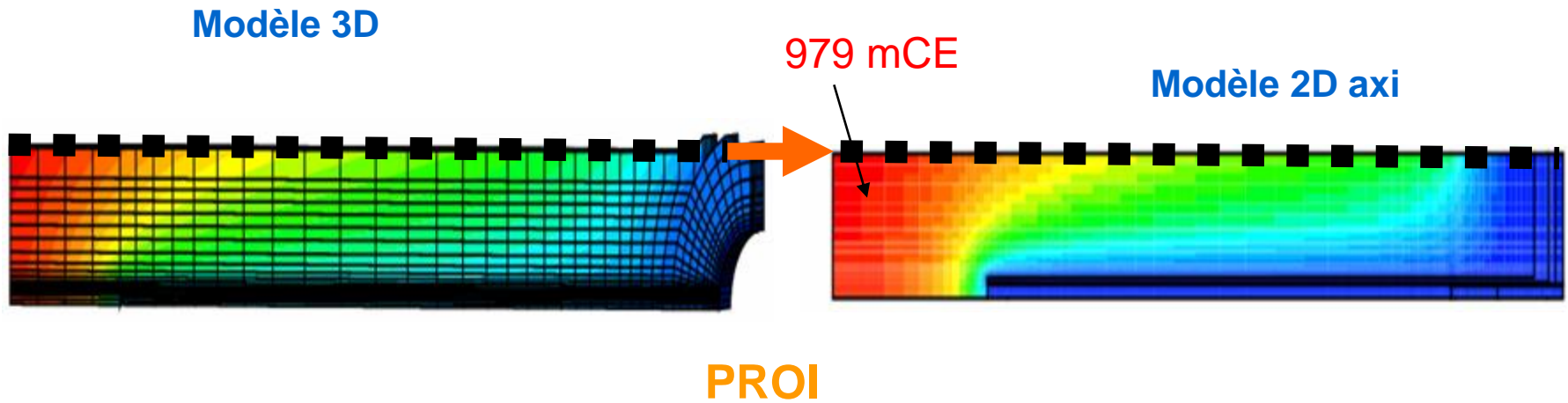
6 m

PROI

Cast3m

Récupération de la thermique 3D et définition sur le modèle 2D axi : **PROI**

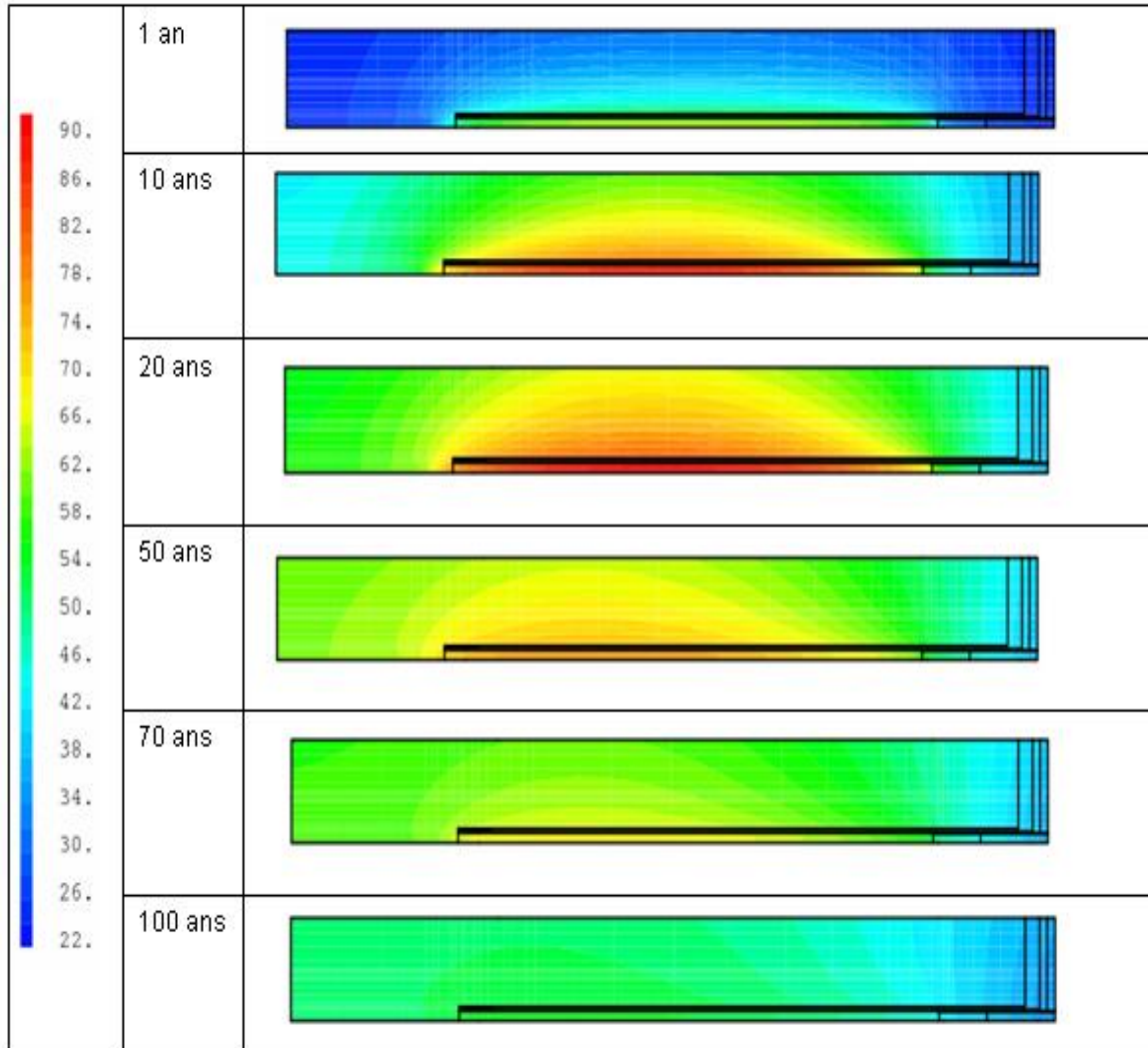
PROI effectue la projection des composants d'un MCHAML définis sur les nœuds d'une géométrie donnée sur une nouvelle géométrie



Cast3m

Récupération de la PW et imposition aux frontières sur le modèle 2D axi : **PROI**

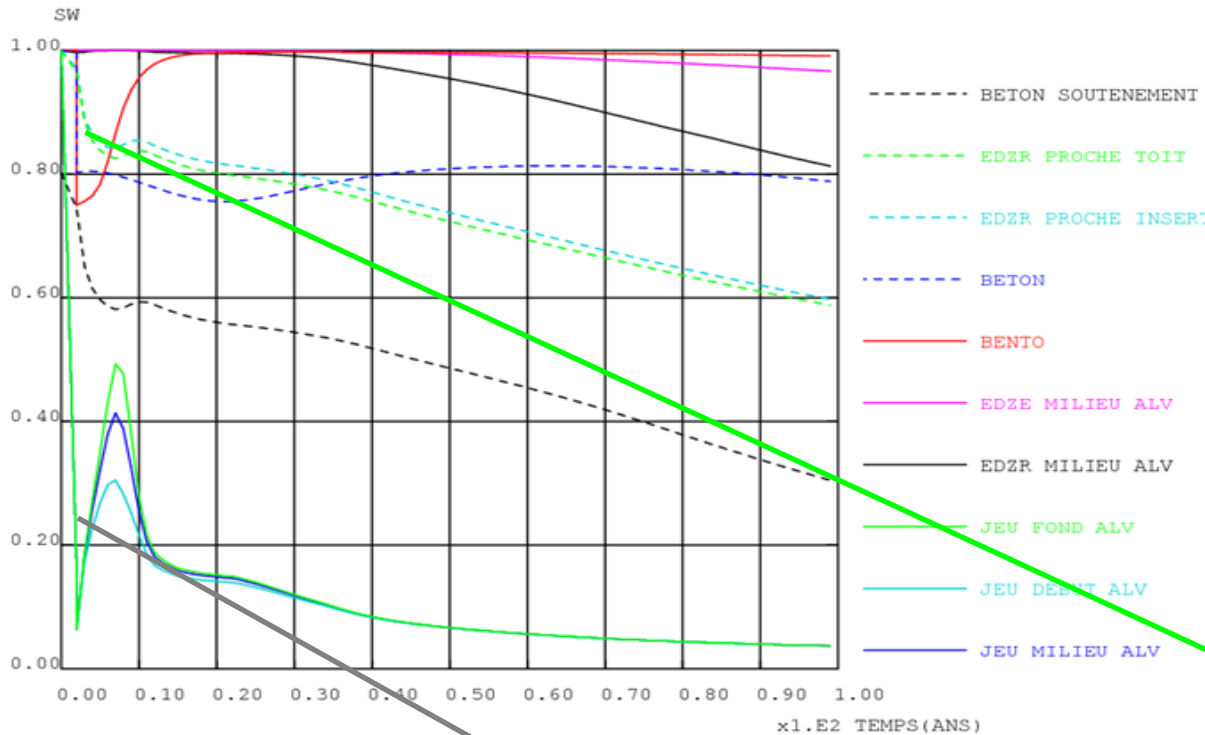
Dégagement de chaleur des colis présent dans l'alvéole



La thermique influe sur le modèle :

- Viscosité de l'eau
- Masse volumique de l'eau/vapeur
- Loi d'état des GP
- Loi de Stokes-Einstein

Saturation en eau dans les milieux (sondes)

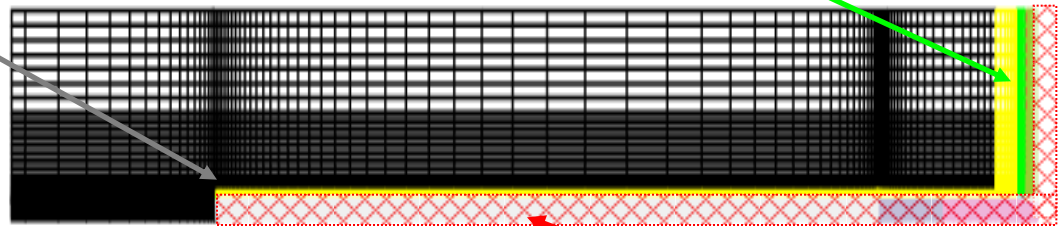


Phase d'ouverture de l'alvéole :

Jusqu'à 2 ans

Ventilation de l'alvéole qui entraîne désaturation des milieux

EDZ autour galerie

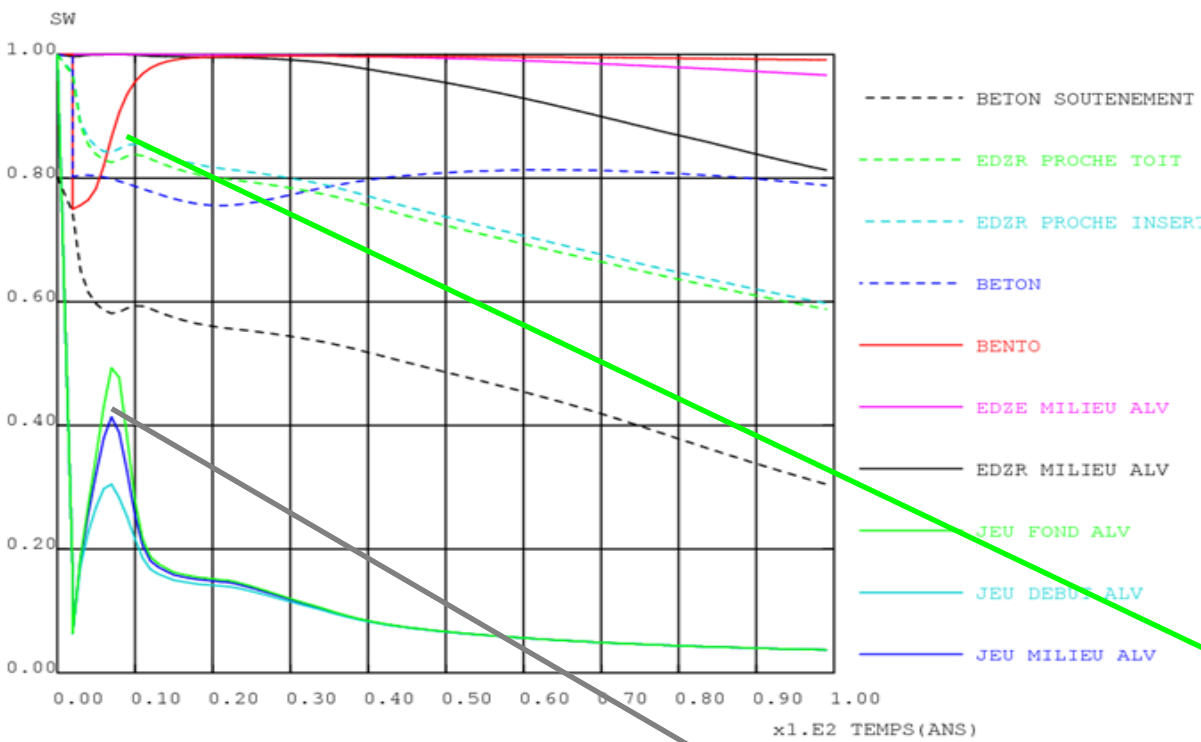


jeu

Ventilation alvéole

Cas de référence : Le transitoire hydro-gaz

Saturation en eau dans les milieux (sondes)



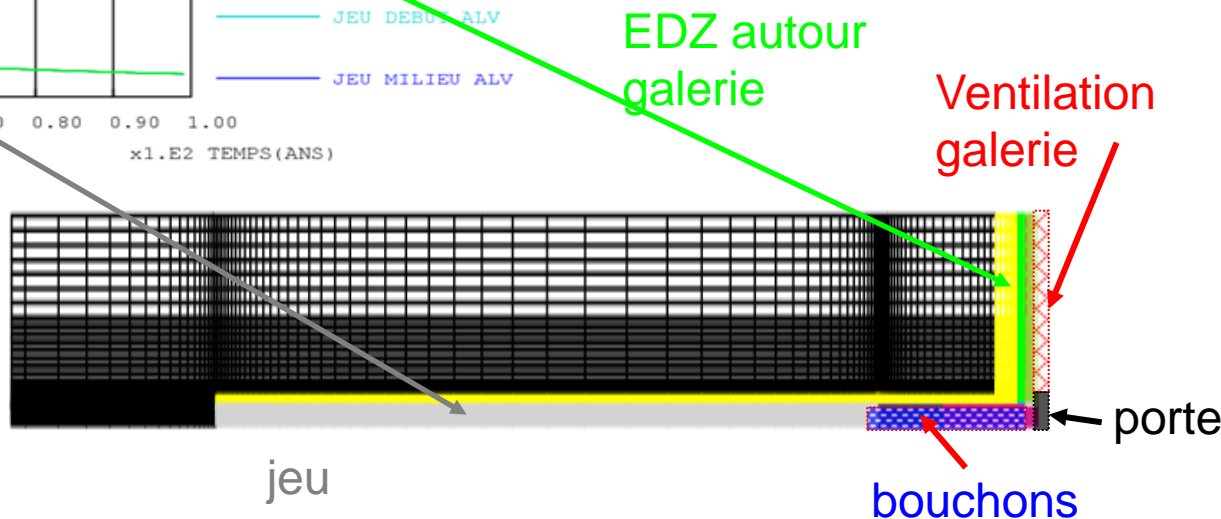
Phase de fermeture de l'alvéole :

De 2 à 5 ans

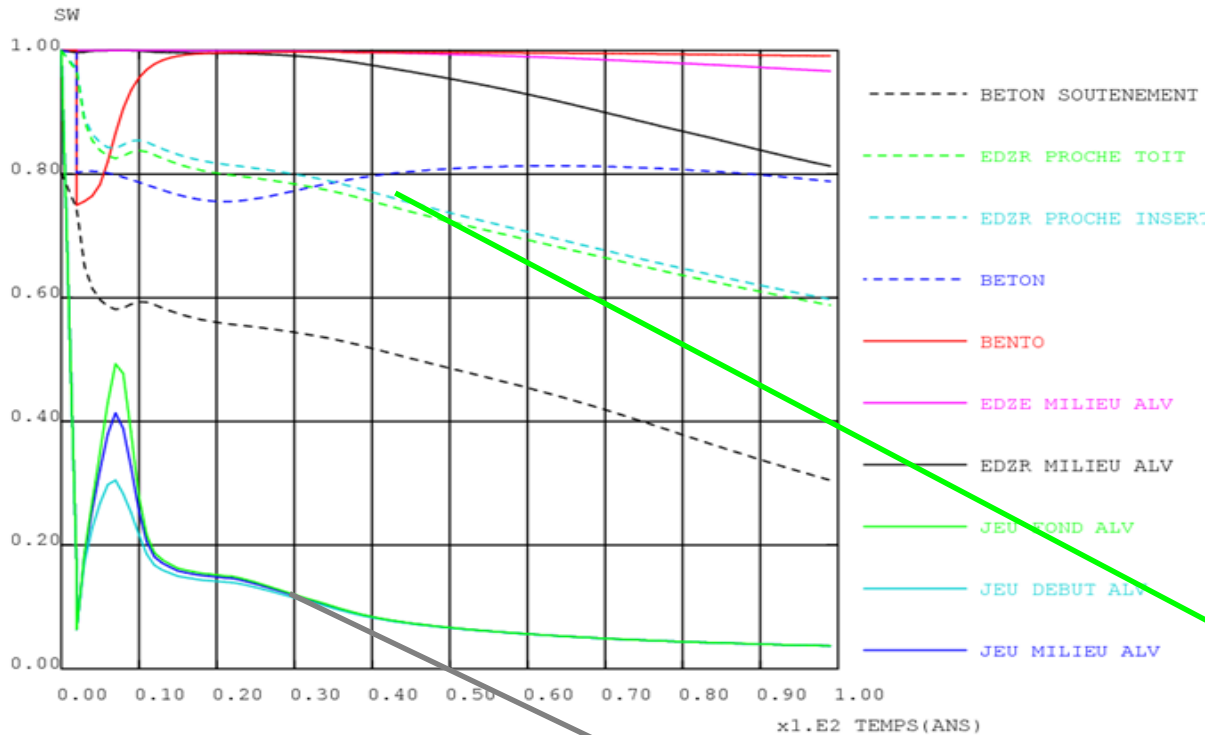
Retour de l'eau dans les jeux et EDZR autour galerie

A noter entre 5 et 10 ans

Saturation dans le jeu > 20%



Saturation en eau dans les milieux (sondes)



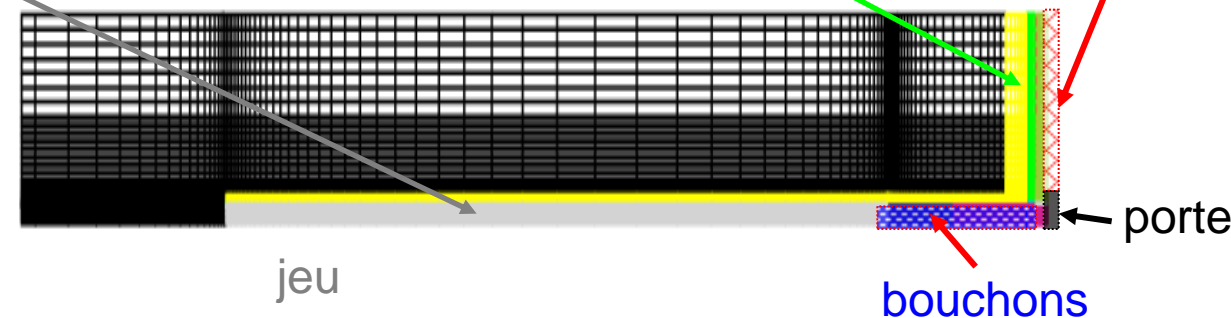
Phase de fermeture de l'alvéole :

De 5 à 100 ans

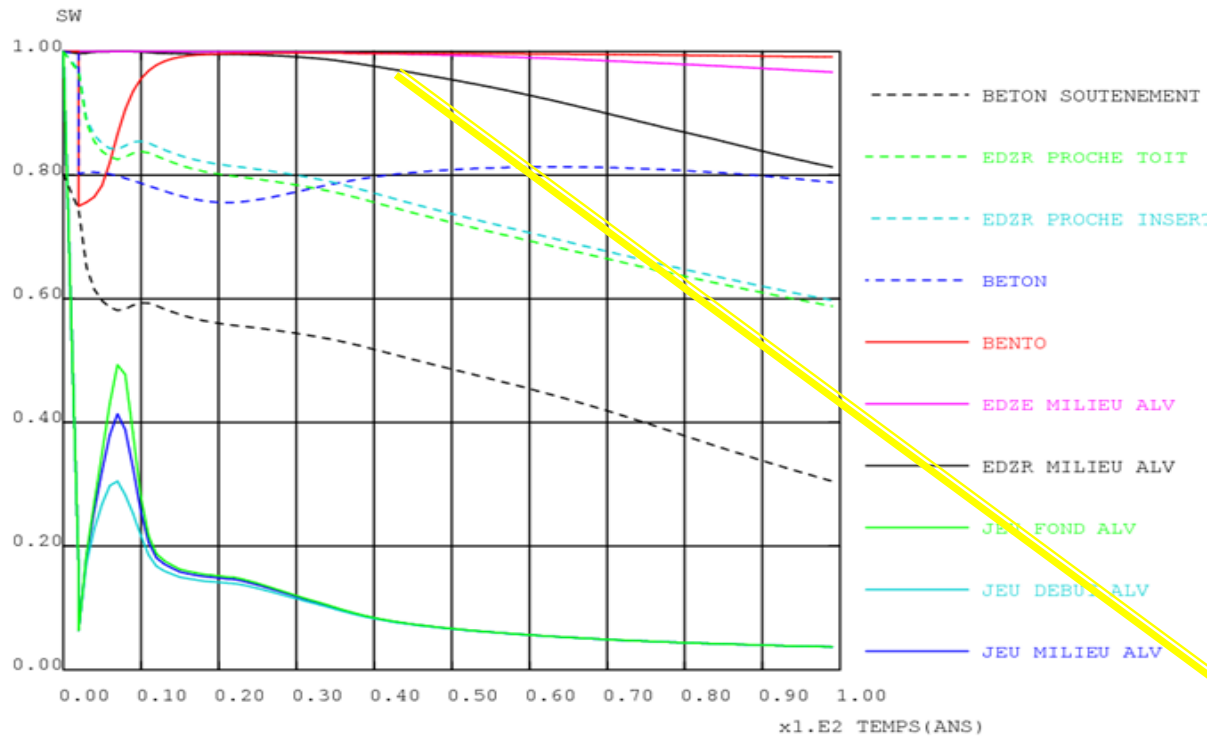
Ventilation de la galerie entraîne une désaturation des milieux autour de la galerie

EDZ autour galerie

Ventilation galerie



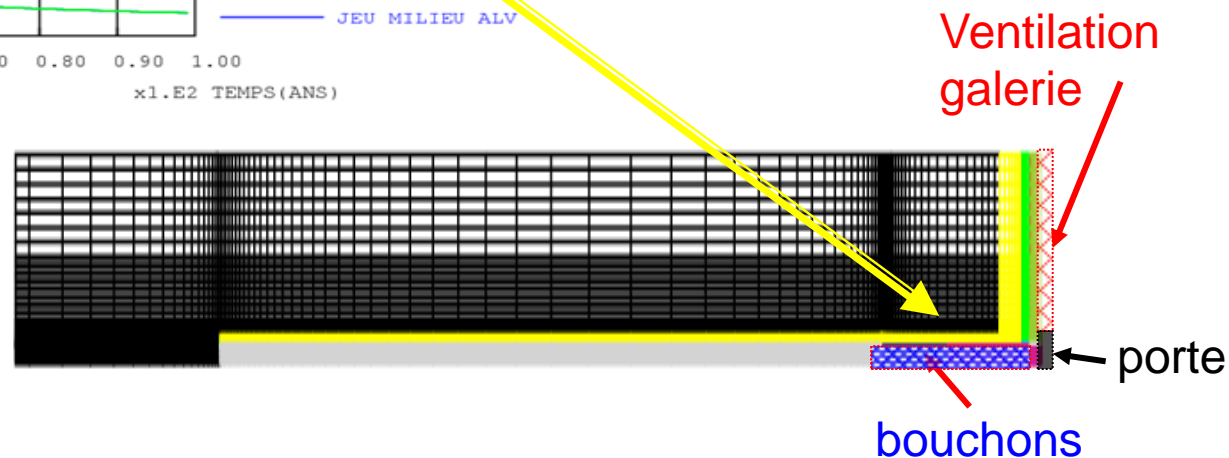
Saturation en eau dans les milieux (sondes)



Phase de fermeture de l'alvéole :

A partir de 10 ans

Ventilation + production d'H₂ parviennent peu à peu à désaturer l'EDZ le long de l'insert



Zones de production de H₂ et de consommation de O₂



Zones où il y a de l'acier :



Dans le jeu : le chemisage



Dans l'insert



Dans l'EDZ autour de la galerie : boulons



Dans le béton autour de la galerie : armatures et treillis

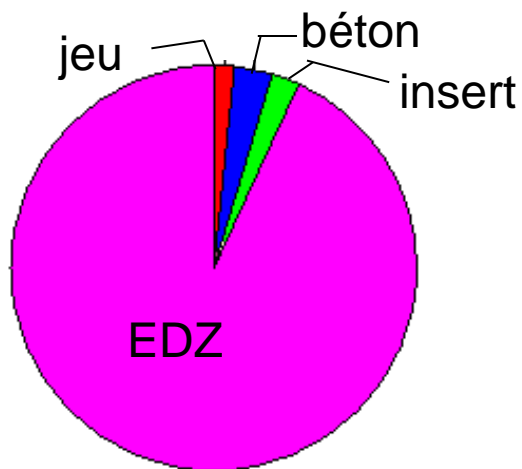


Arrivée d'O₂ par la ventilation de la galerie

Zones de production de H₂ et de consommation de O₂

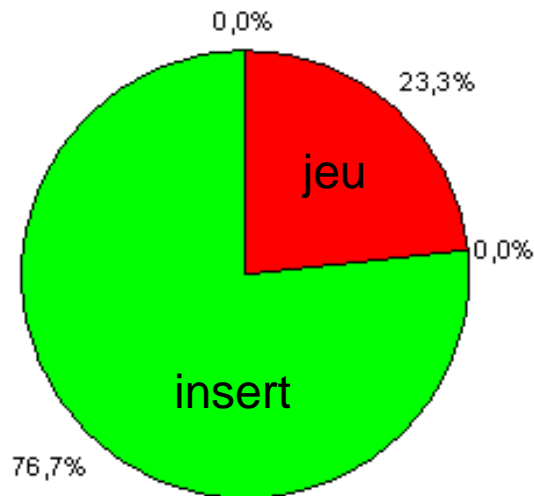


Répartition consommation O₂ à 100 ans



-> car EDZ vitesse de corrosion 3 fois plus importante que autres matériaux

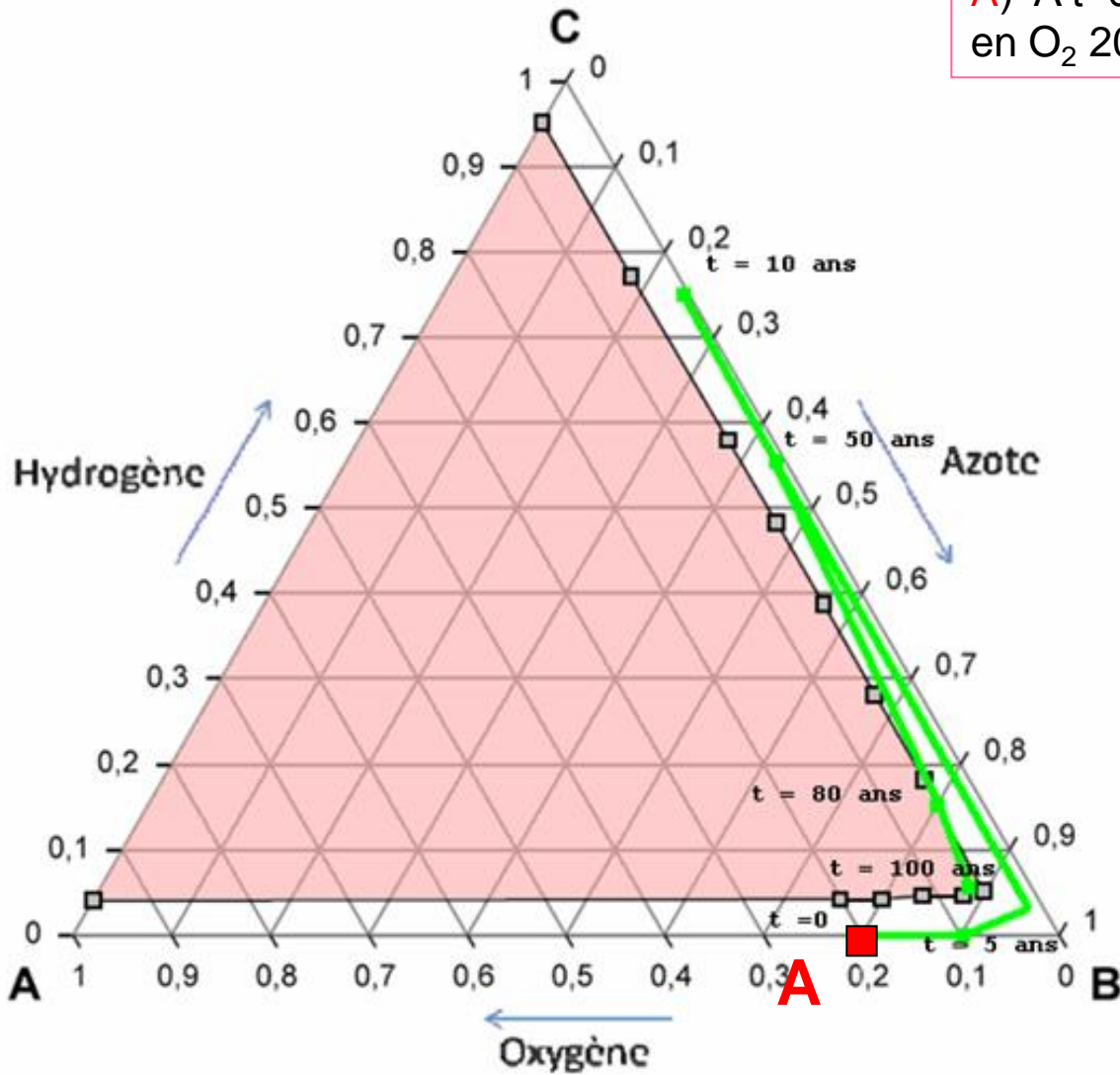
Répartition production H₂ à 100 ans



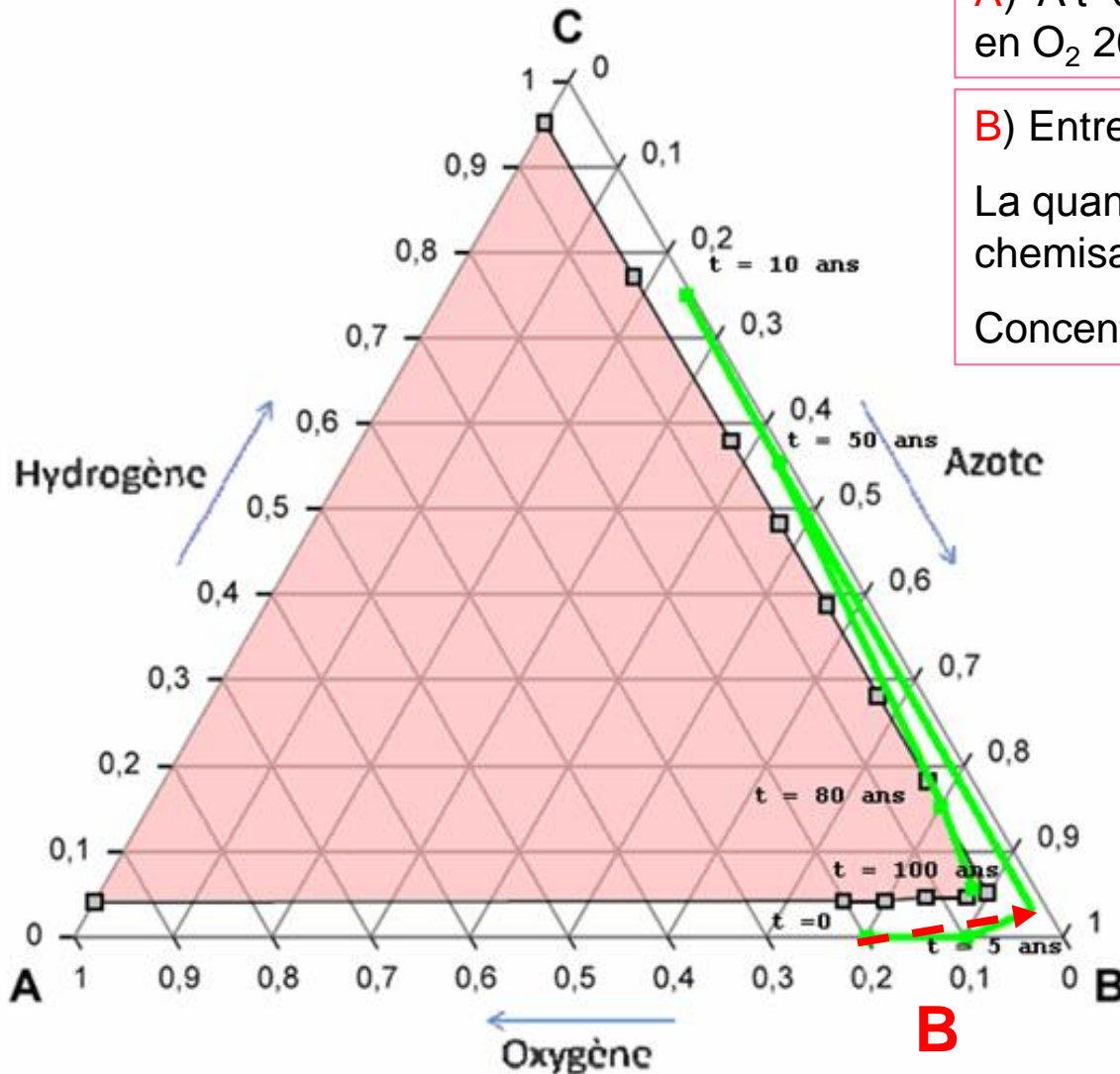
-> car il faut que O₂ < 1% + saturation en eau > 20%

Cas de référence : les concentrations d'H₂ et d'O₂ dans le jeu

A) A t=0 fermeture de l'alvéole (concentration en O₂ 20%)



Cas de référence : les concentrations d'H₂ et d'O₂ dans le jeu



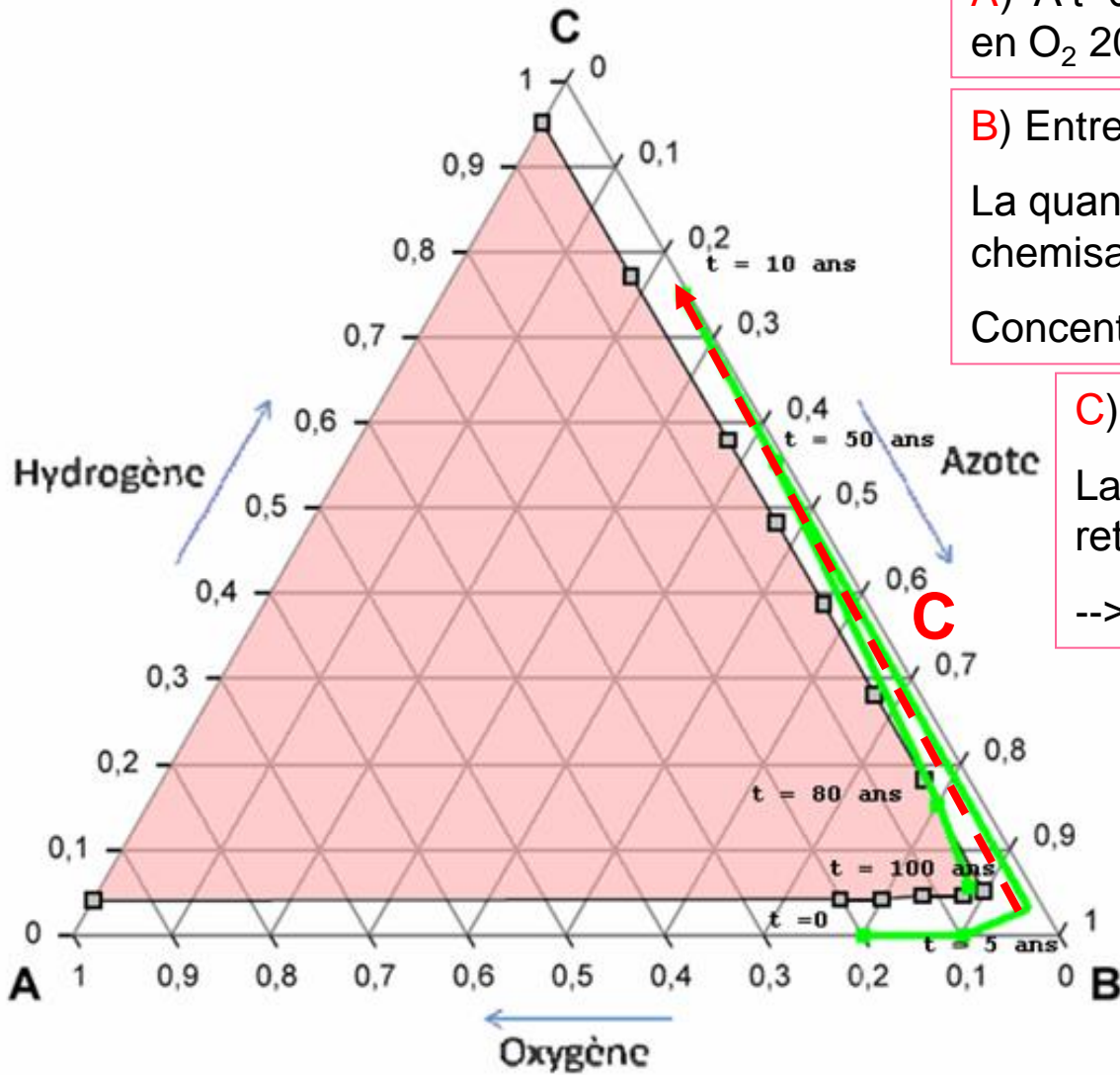
A) A t=0 fermeture de l'alvéole (concentration en O₂ 20%)

B) Entre 0 et 5 ans

La quantité d'O₂ diminue (consommation par le chemisage du jeu)

Concentration en O₂ passe de 0,2 à 0,01

Cas de référence : les concentrations d'H₂ et d'O₂ dans le jeu

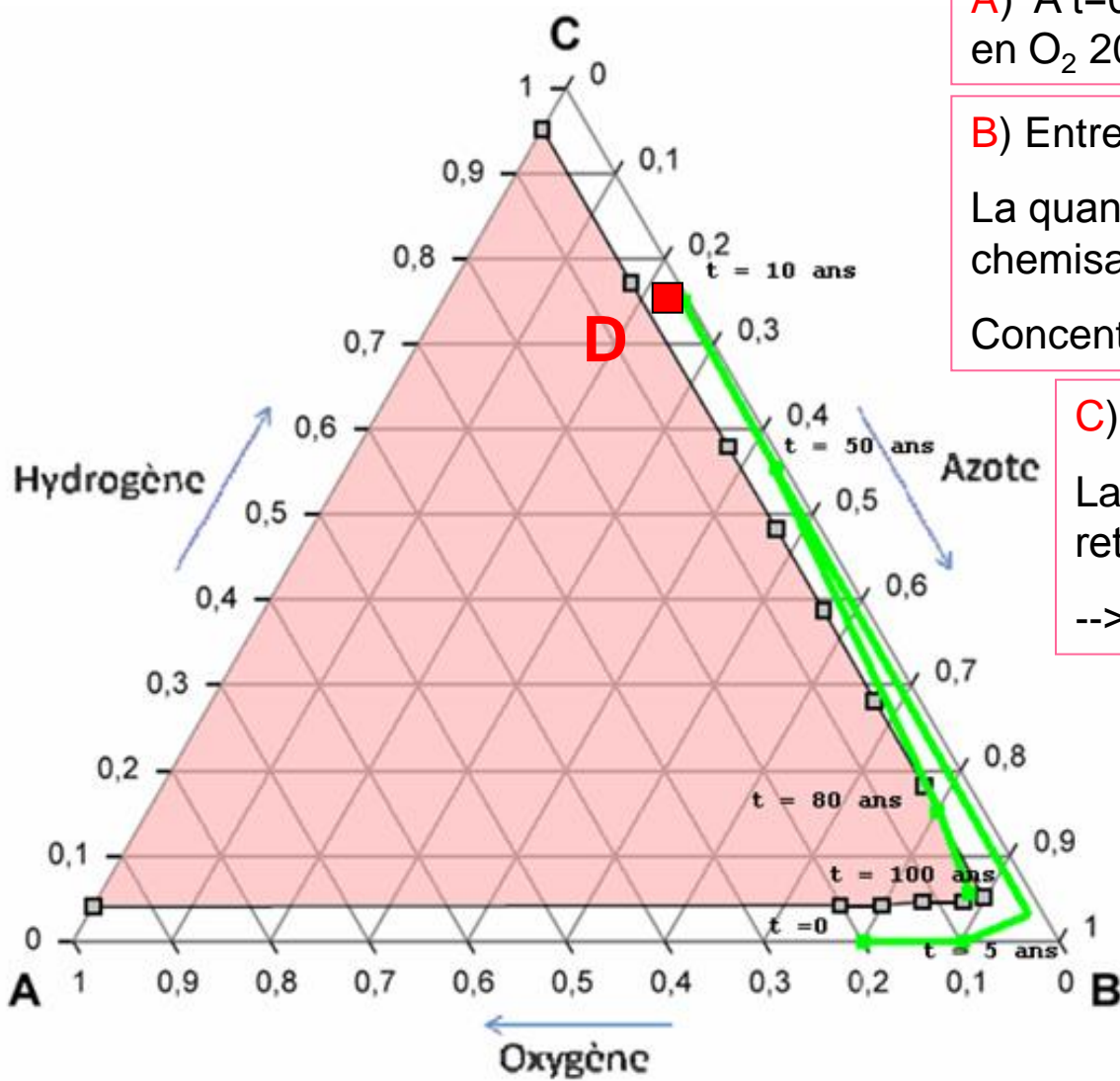


A) A t=0 fermeture de l'alvéole (concentration en O₂ 20%)

B) Entre 0 et 5 ans
 La quantité d'O₂ diminue (consommation par le chemisage du jeu)
 Concentration en O₂ passe de 0,2 à 0,01

C) Entre 5 et 10 ans
 La concentration en O₂ est assez faible + retour de l'eau (cf. saturation > 20%)
 --> production d'H₂

Cas de référence : les concentrations d'H₂ et d'O₂ dans le jeu



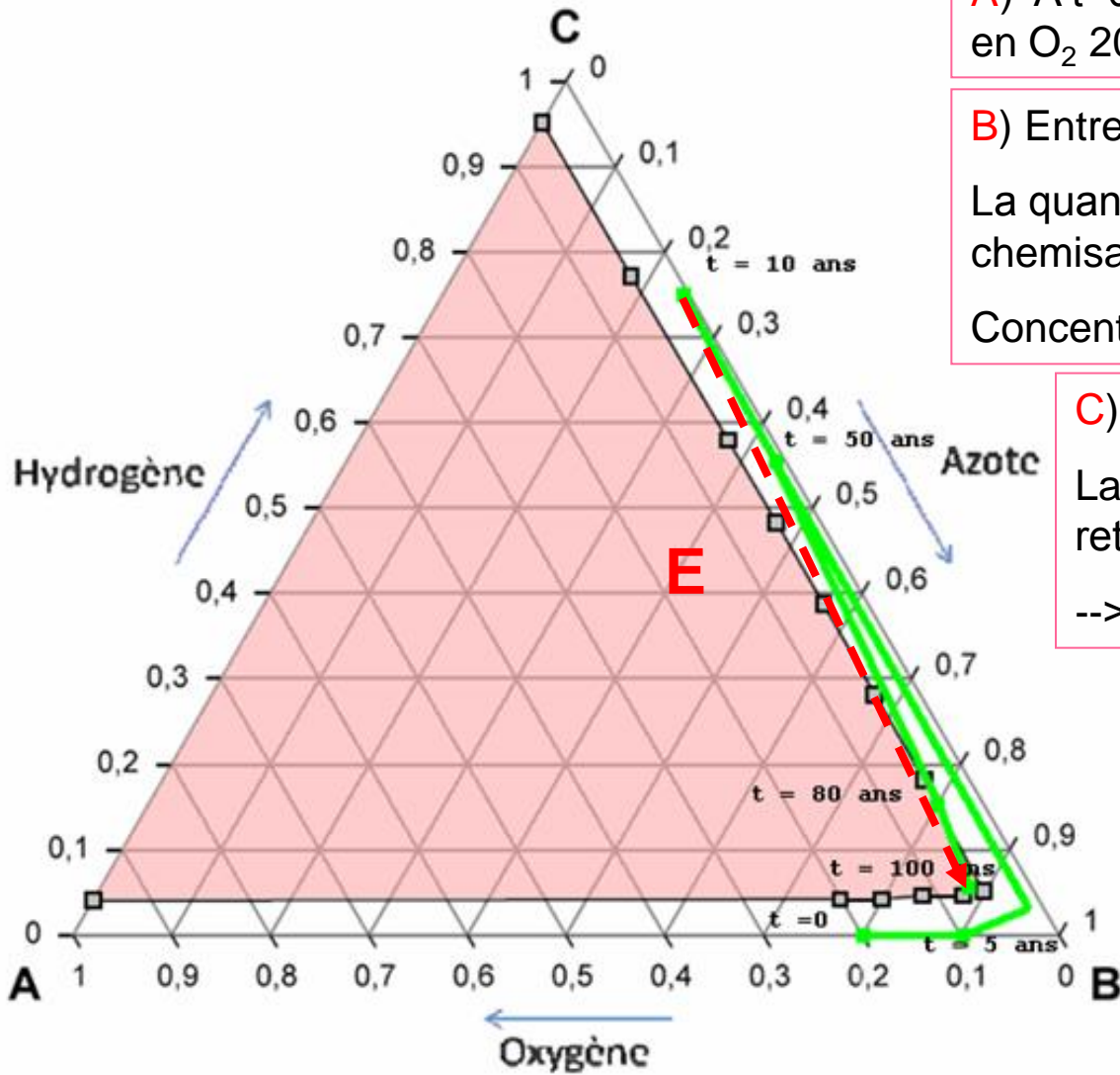
A) A t=0 fermeture de l'alvéole (concentration en O₂ 20%)

B) Entre 0 et 5 ans
 La quantité d'O₂ diminue (consommation par le chemisage du jeu)
 Concentration en O₂ passe de 0,2 à 0,01

C) Entre 5 et 10 ans
 La concentration en O₂ est assez faible + retour de l'eau (cf. saturation > 20%)
 --> production d'H₂

D) A 10 ans
 La saturation en eau redevient inférieure à 20% donc arrêt de la production d'H₂

Cas de référence : les concentrations d'H₂ et d'O₂ dans le jeu



A) A t=0 fermeture de l'alvéole (concentration en O₂ 20%)

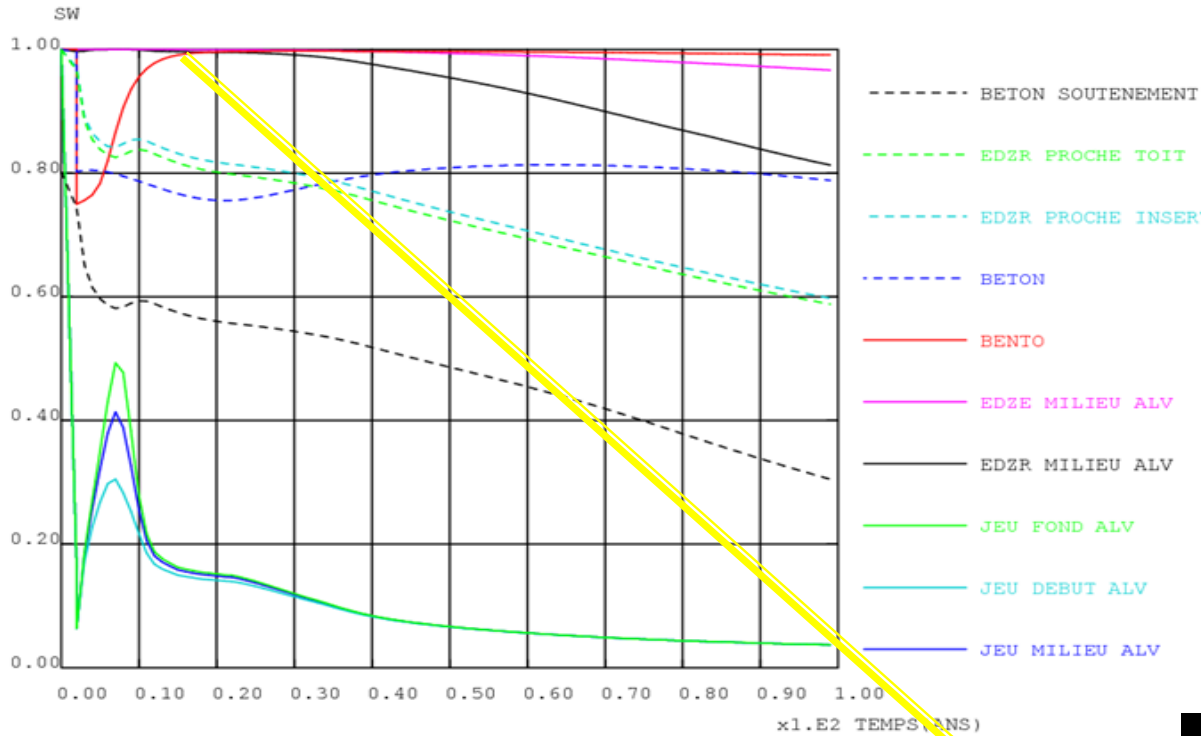
B) Entre 0 et 5 ans
 La quantité d'O₂ diminue (consommation par le chemisage du jeu)
 Concentration en O₂ passe de 0,2 à 0,01

C) Entre 5 et 10 ans
 La concentration en O₂ est assez faible + retour de l'eau (cf. saturation > 20%)
 --> production d'H₂

D) A 10 ans
 La saturation en eau redevient inférieure à 20% donc arrêt de la production d'H₂

E) De 10 à 100 ans
 La quantité d'H₂ ↘ et la quantité d'O₂ ↗ dans le jeu

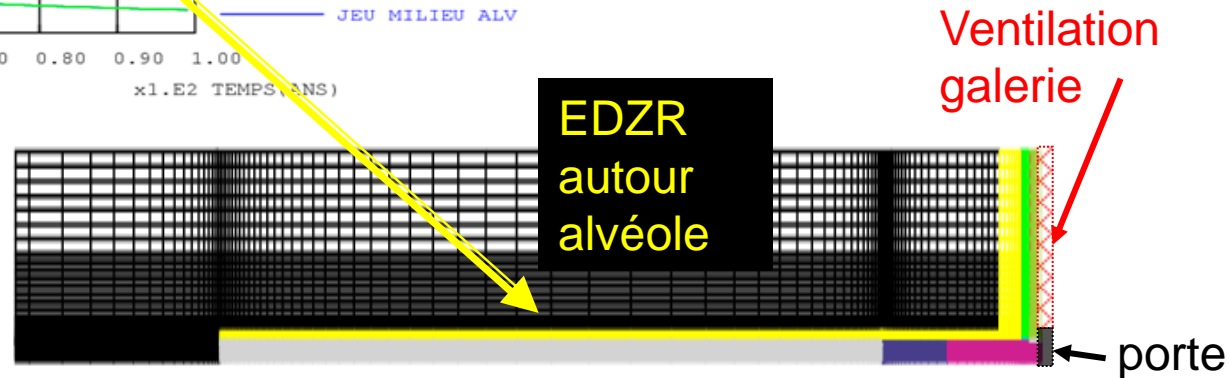
Saturation en eau dans les milieux (sondes)



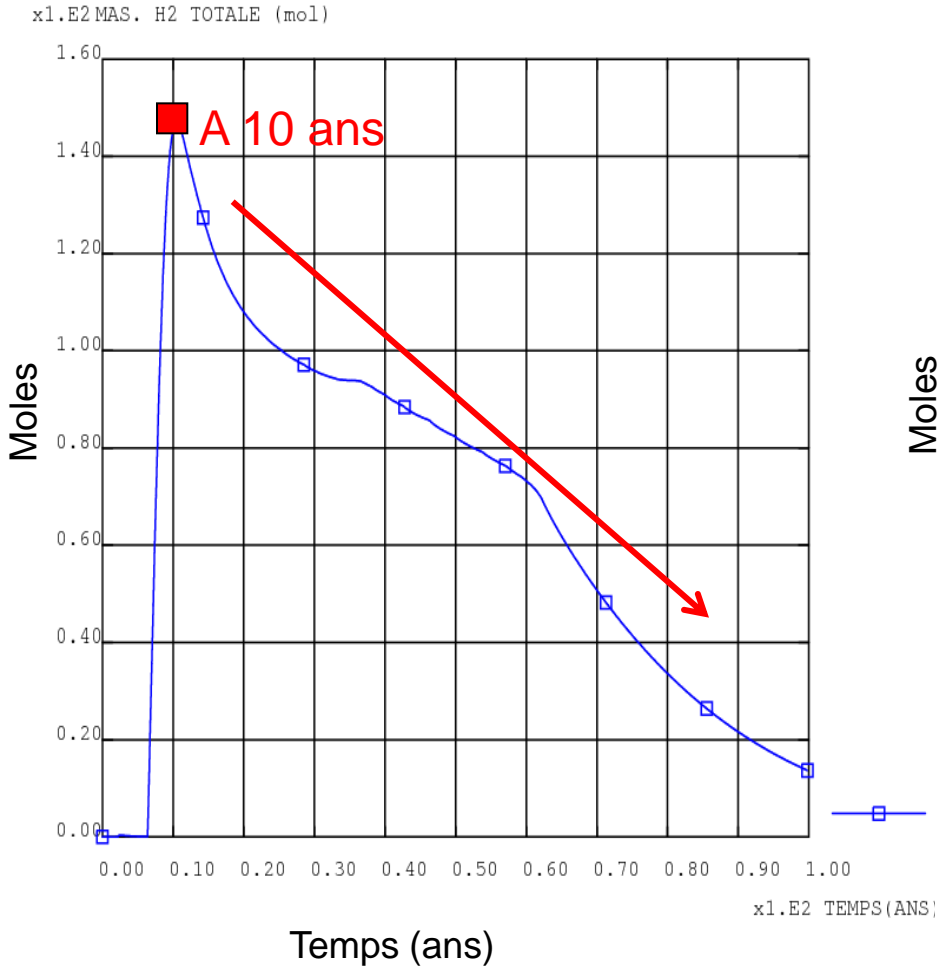
L'EDZ se désature à partir de 10 ans ce qui va créer un **passage** entre le jeu et la ventilation.

L'hydrogène va partir du jeu via l'EDZ

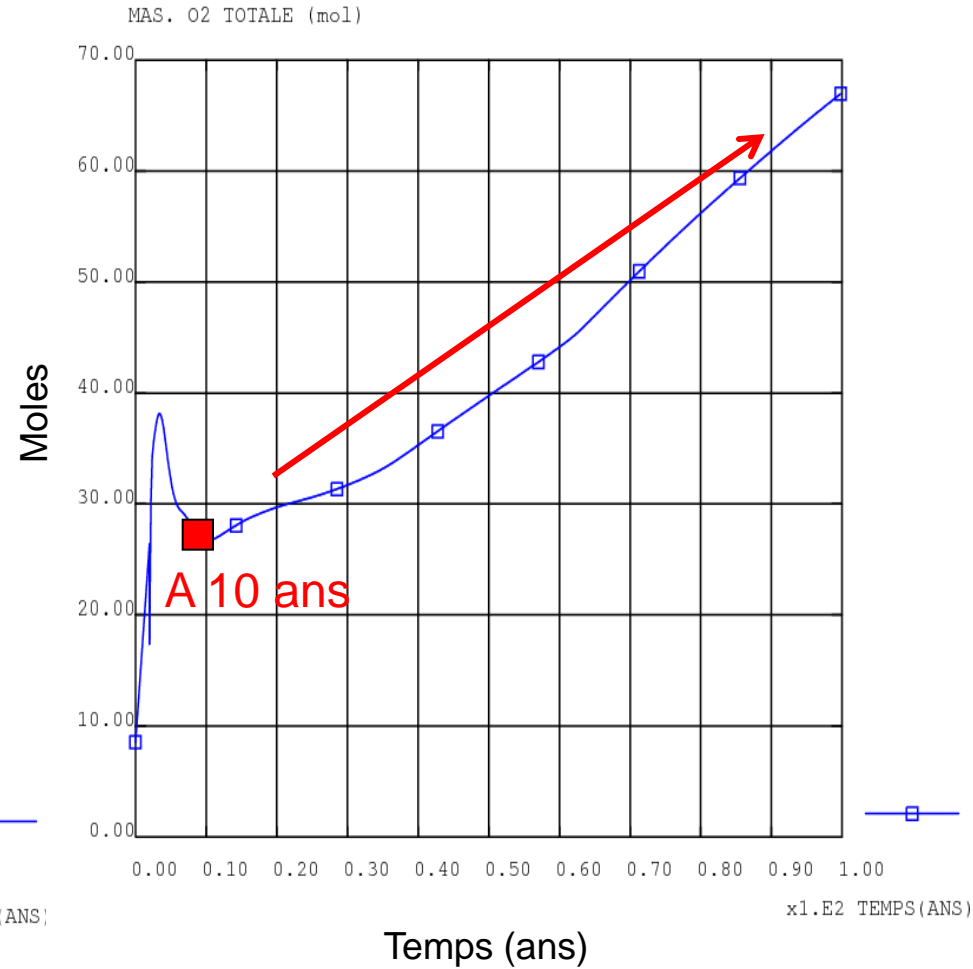
L'oxygène va atteindre le jeu via l'EDZ

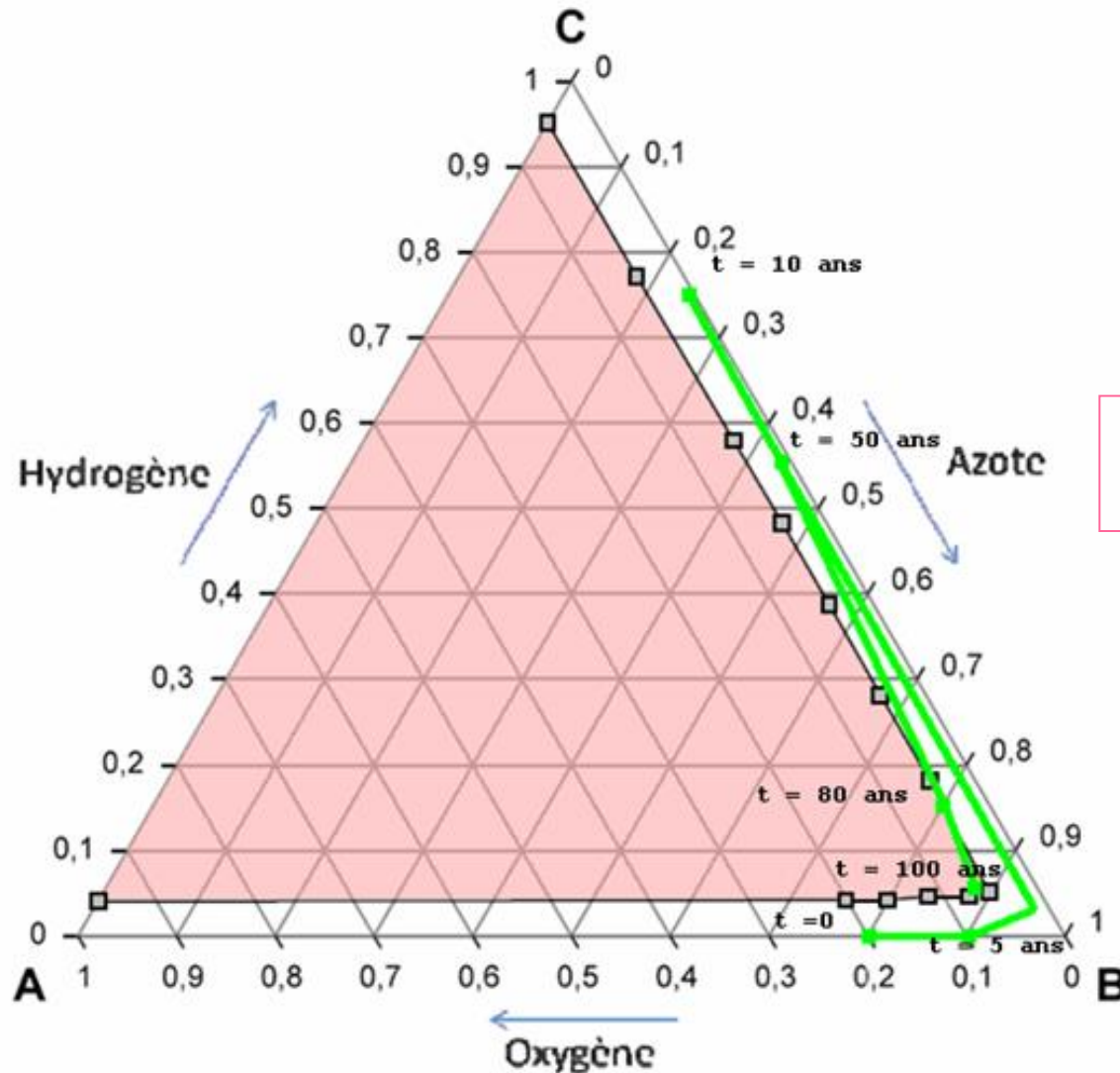


Nombre de moles d'H₂ dans le modèle



Nombre de moles d'O₂ dans le modèle

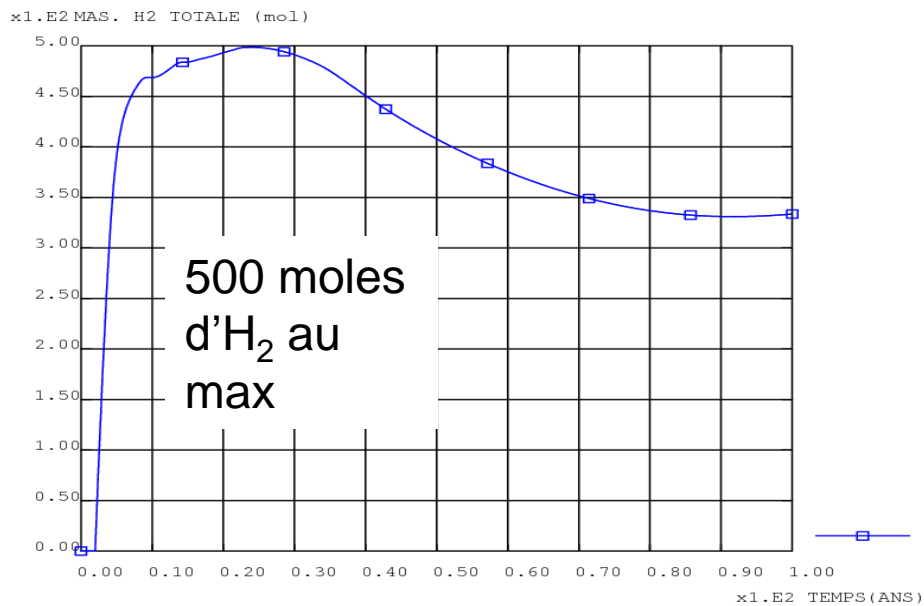
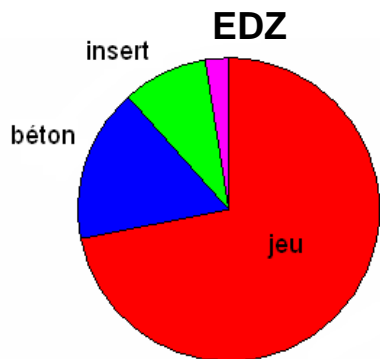




Finalemment risque ATEX entre 80 et 100 ans

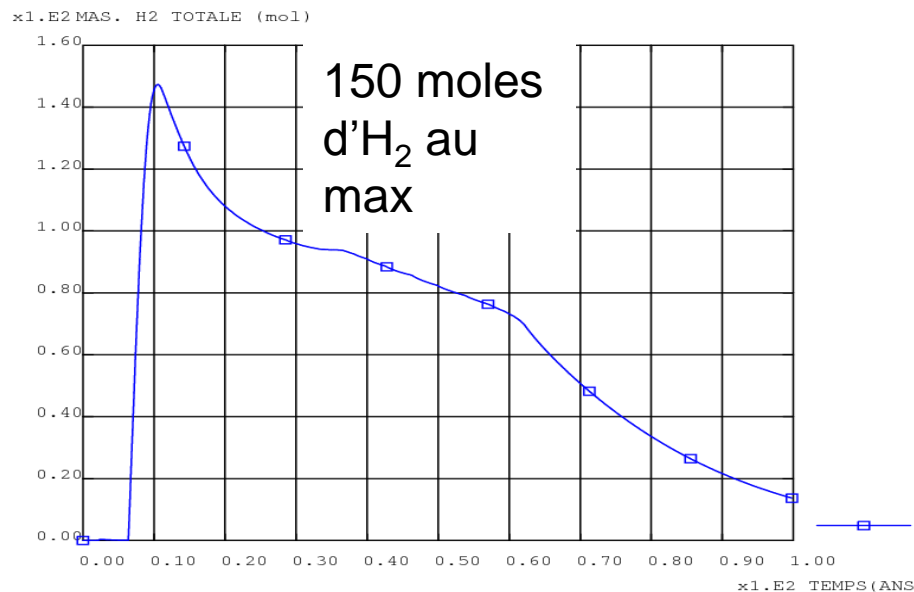
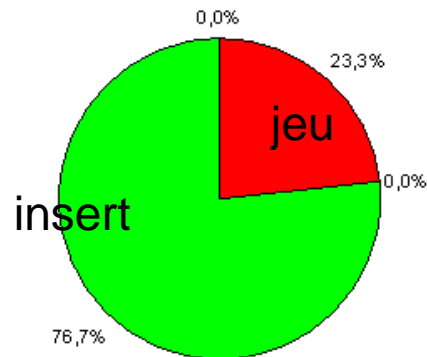
Répartition production H₂ à 100 ans

SENSIBILITE

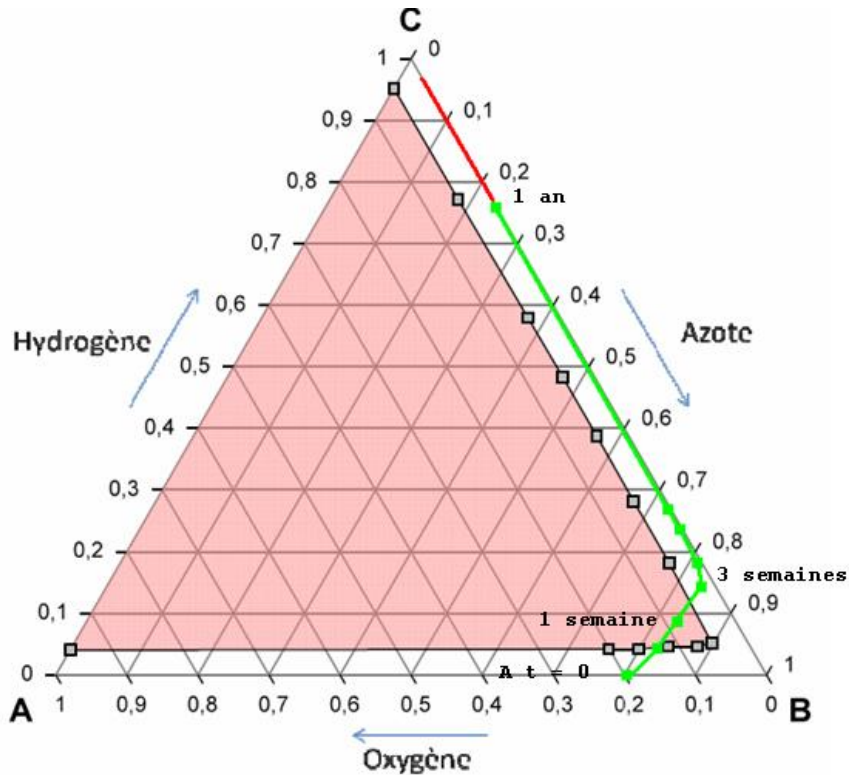


Répartition production H₂ à 100 ans

REFERENCE

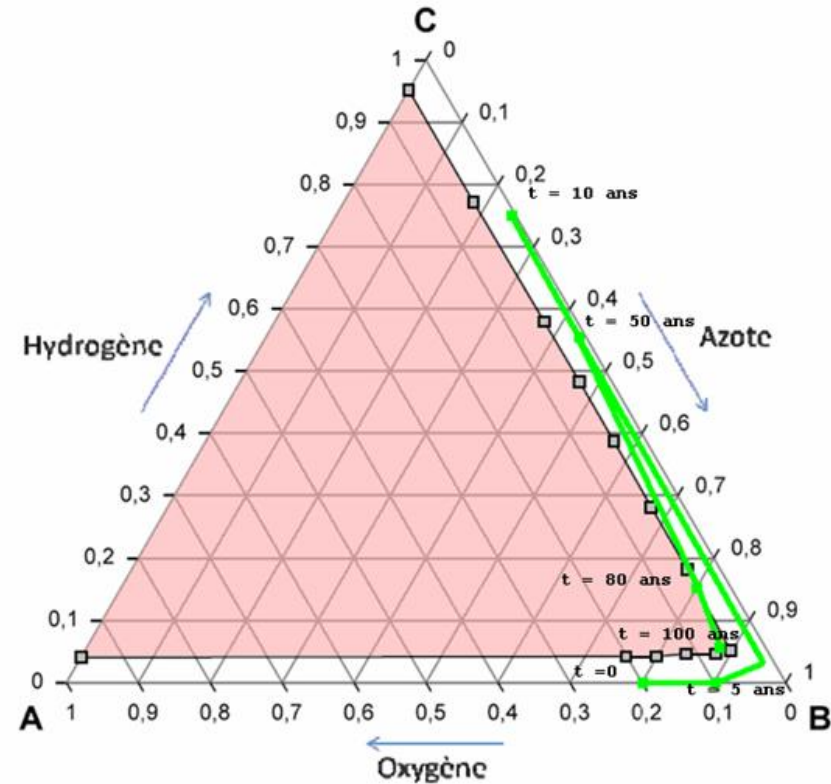


Risque ATEX SENSIBILITE

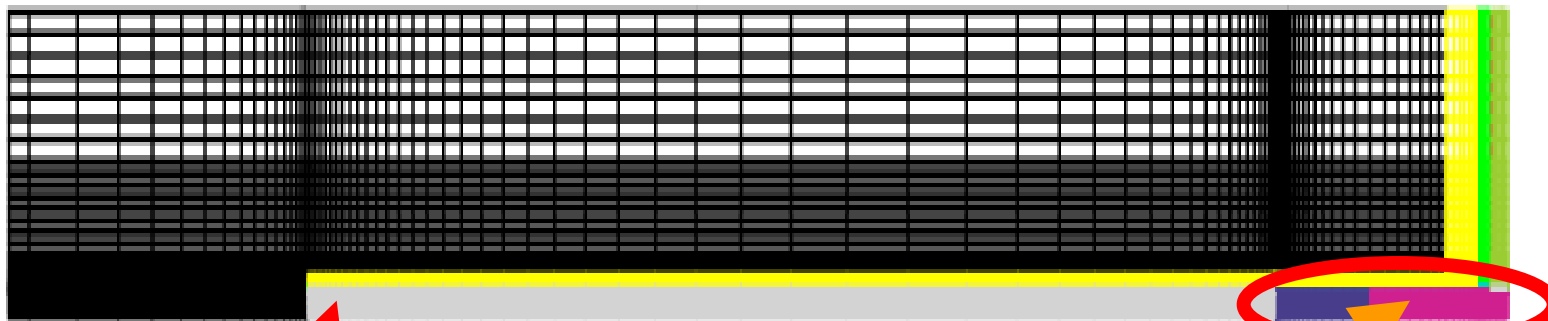


- H₂ produit rapidement et en grande quantité dans le jeu
- O₂ issu de la ventilation de la galerie ne parvient pas jusqu'au jeu

Risque ATEX REFERENCE

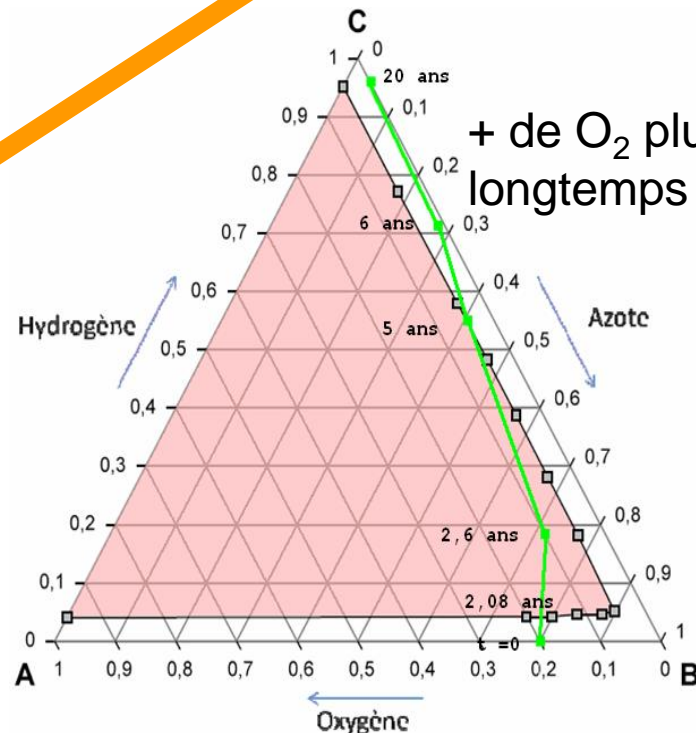
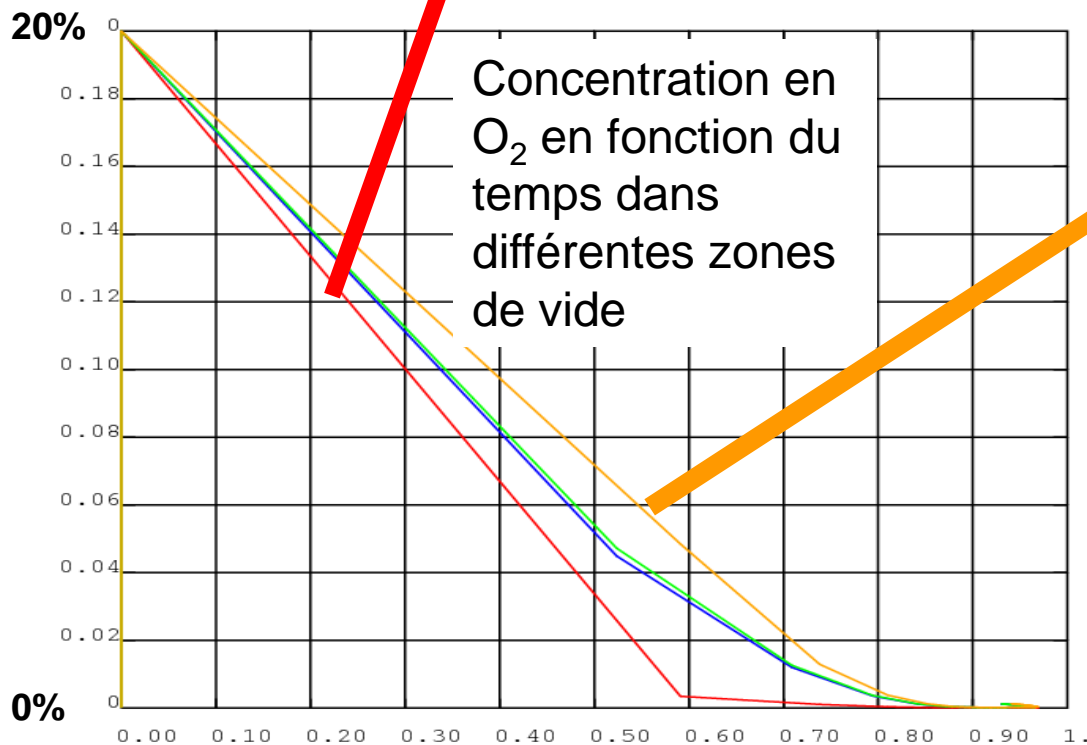


- H₂ produit lorsque O₂ faible + saturation en eau > 20%
- O₂ issu de la ventilation de la galerie parvient jusqu'au jeu



vide

+ de O₂ plus longtemps



Sur le risque ATEX

- identifié dans le temps et dans l'espace
- scellement de l'alvéole : risque ATEX très faible
- autre option de fermeture : résultat instructif pour les choix d'exploitation

Sur le plan de l'étude

Représentativité phénoménologique poussée (thermo-hydro-gaz, corrosion, oxydation linéaire, multi-gaz, multi-espèces,...)

résultats de l'étude satisfaisants

problèmes numériques tous surmontés

Sur l'utilisation de CAST3M

Interface conversationnel GIBIANE (développée par SOCOTEC) : un + pour la conduite de mission (travail en équipe, vérification, traçabilité, fiabilisation...)

Boite à outils numériques CAST3M pour l'élaboration des modèles physiques et numériques (modules diphasiques milieu poreux)

*Merci pour votre
attention*