

I - Evolution des conditions ambiantes dans tout le stockage géologique de l'ANDRA durant son exploitation

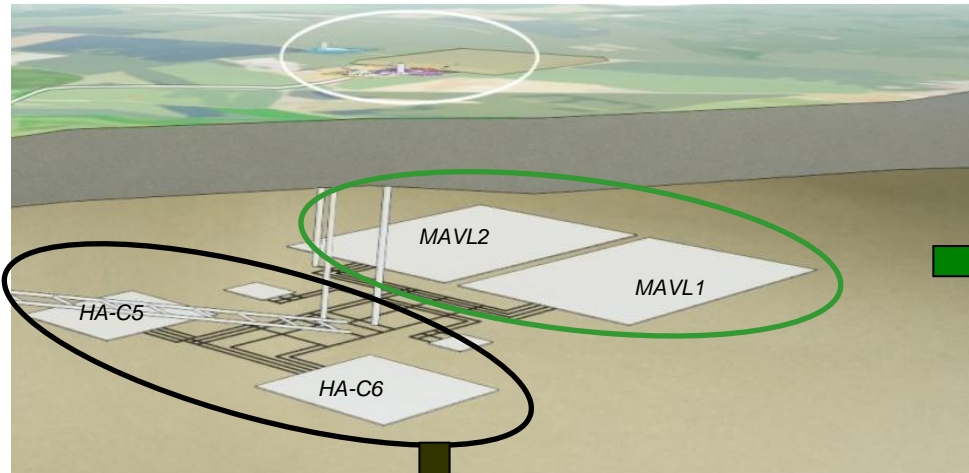
C.Tulita, L-V.Bénet

II - La ventilation d'une alvéole thermique MAVL

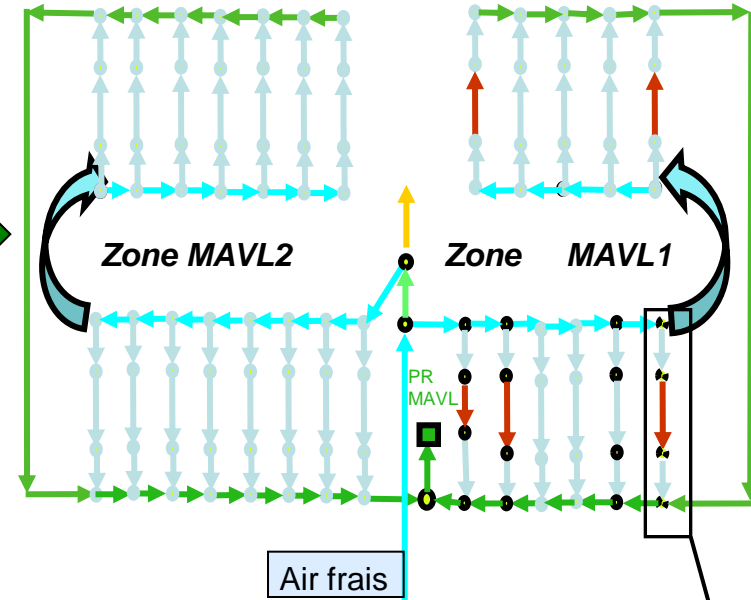
C.Bouillet, L-V.Bénet

I – Architecture et schéma de ventilation

LE STOCKAGE (une architecture possible)

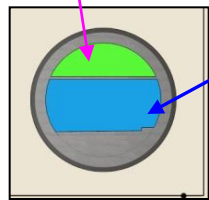


Modèle filaire de la ventilation MAVL

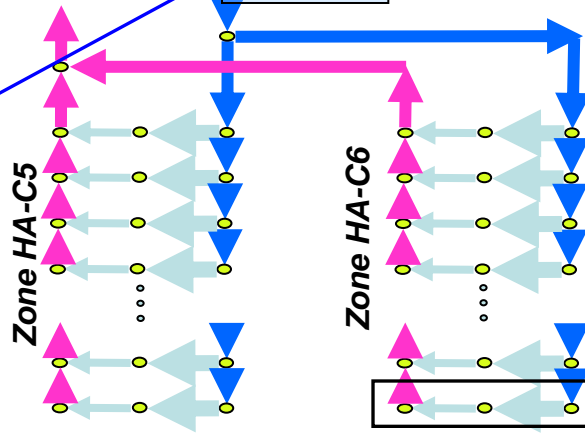


Air « nucléaire »

Air frais

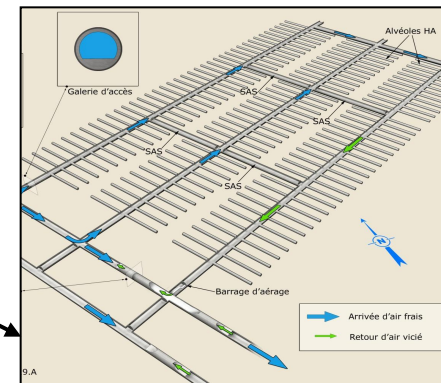


Galerie HA

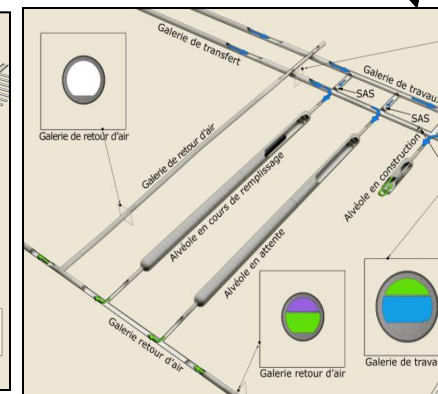


Modèle filaire de la ventilation HA

Modules de stockage HA

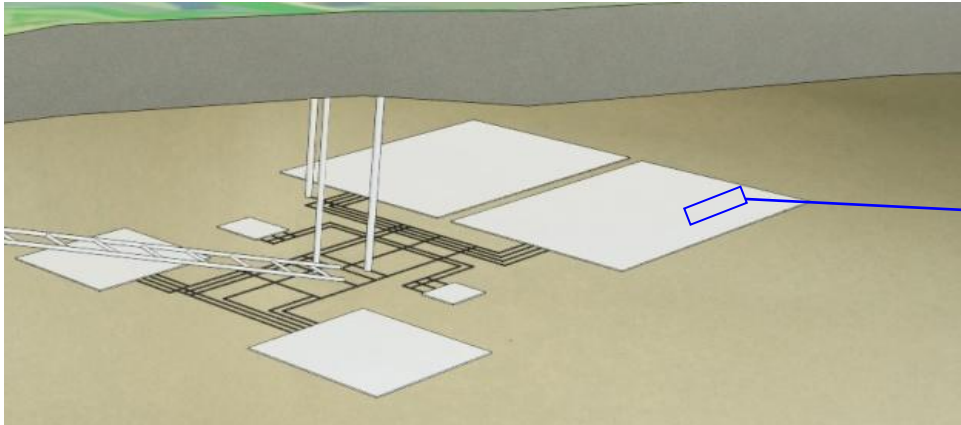


... et MAVL

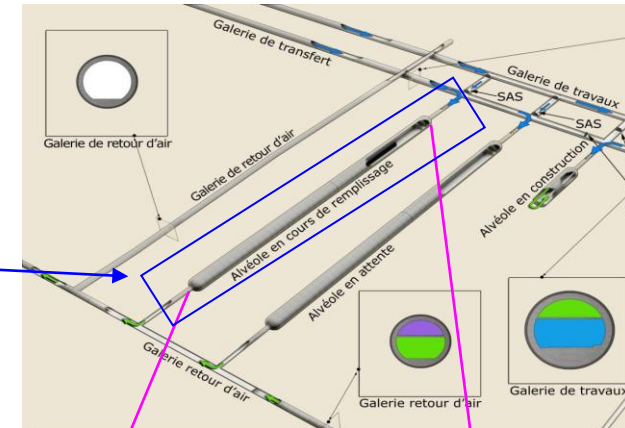


II - L'alvéole de déchets de Moyenne Activité Vie Longue (MAVL)

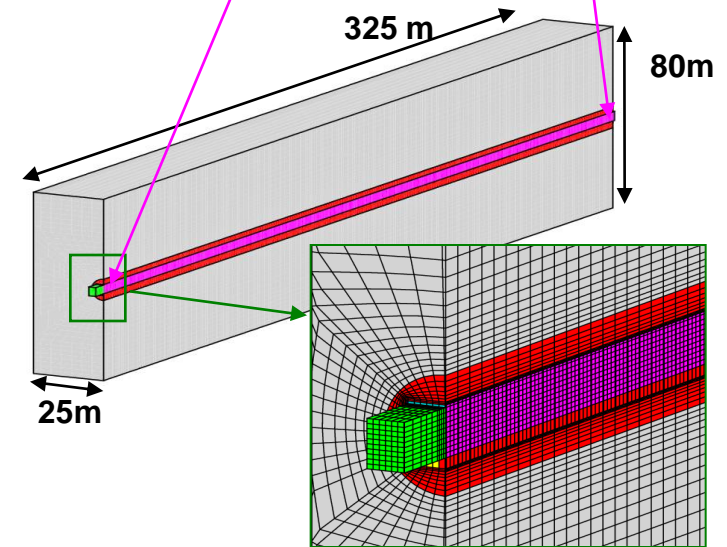
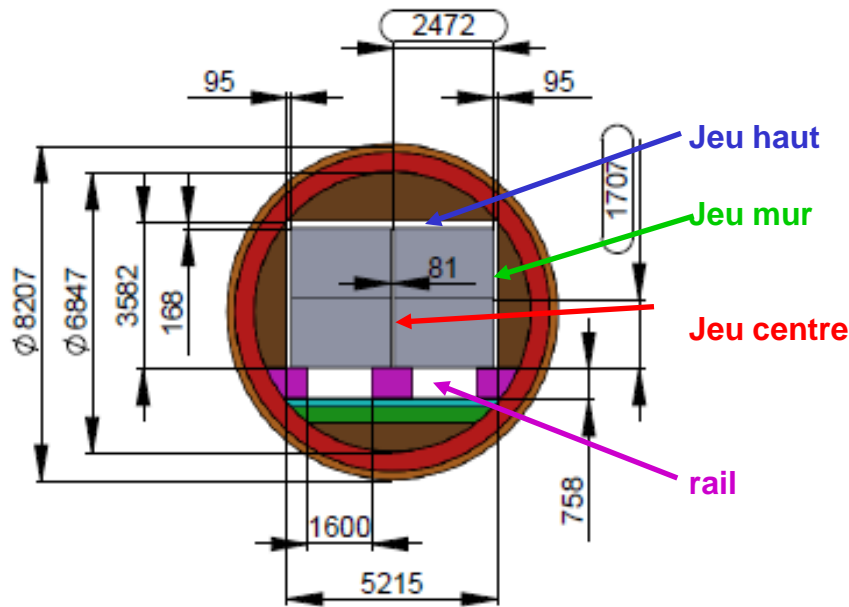
LE STOCKAGE (une architecture possible)



MODULE MAVL



SECTION D'ALVEOLE
Avant projet ANDRA 2009



MAILLAGE DU DOMAINE DE CALCUL

I - Caractérisation des conditions ambiantes et environnementales

Les conditions ambiantes : température d'air et humidité relative

... sont déduites du calcul par simulation numérique des variables suivantes

- | | |
|--|---------------------------------|
| (i) la température d'air | (ii) la concentration de vapeur |
| (iii) la température des murs et de la roche | (iv) le débit de condensation, |
| (v) la pression d'air, | |

... dépendent du phasage d'exploitation et du climat

- Du transitoire séculaire de construction et d'exploitation du stockage

Ouverture d'un module de stockage HA et de 2 modules MAVL tout les 2 ans

- Des conditions climatiques en entrée de la ventilation

*Mesures **horaires** de température et d'humidité sur la station de Bure (2002-2004)*



Deux échelles de temps sont à considérées : annuelle et horaire

I - Modélisation physique

Modélisation transferts de vapeur et de chaleur avec CAST3M

Les effets thermiques modélisés dans le stockage...

1. **Le transport de la chaleur par la ventilation** (modèle en réseau filaire 1D)
2. **Les échanges thermiques en paroi** (convection mixtes, couplage bilatéral)
3. **Les échanges thermiques entre air frais et nucléaire** (galeries HA seulement)
4. **La conduction thermique dans les murs** (béton + 50 mètres de roche en 2Daxi)

... et dans les puits :

1. **La compression/détente entre surface et stockage** (550 mètres soit +/-5°C)
2. **La condensation en brouillard (puits de sortie)** (effet de chaleur latente)

Les transferts de vapeur modélisés :

1. **Le transport de la vapeur par la ventilation** (modèle en réseau filaire 1D)
2. **La condensation en paroi de galerie** (extraction du condensat)
3. **Évaporation interstitielle de l'eau géologique fct(t)** (apport de vapeur à l'air)

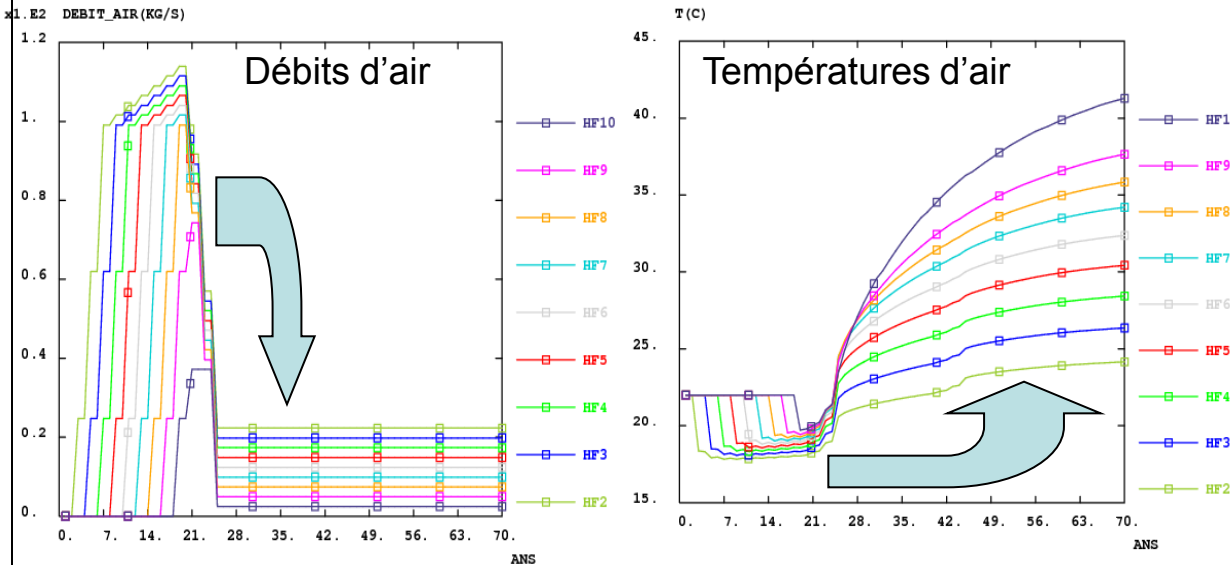
I - Modélisation temporelle de l'exploitation du stockage

Deux échelles de temps \longrightarrow deux types de simulations

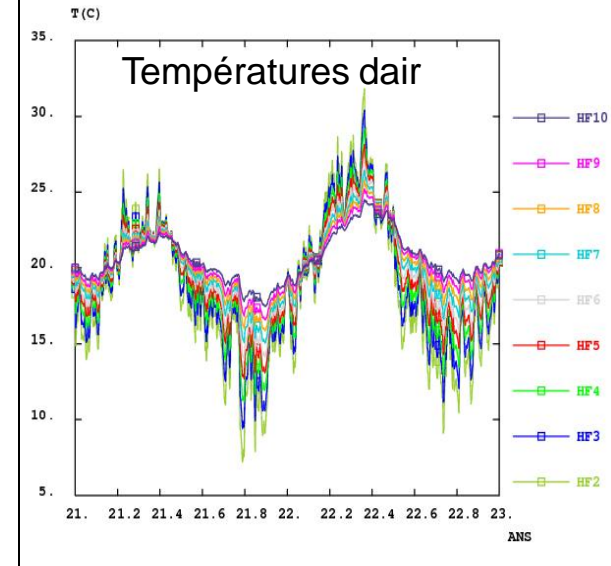
Transitoire séculaire : *pas de temps de 1 an avec moyenne climatique annuelle*

Transitoire biannuel : *pas de temps de 4 heures avec variations climatiques*

transitoire séculaire (70 ans) en amont des modules HAC5



transitoire biannuel (2 ans)



2 ans	Remplissage 1 ^{er} module	30 m ³ /s
8 ans	1 ^{er} module en attente de fermeture	92 m ³ /s
20 ans	ventilation maximale	104 m³/s
26 ans	attente de fermeture généralisée	20 m³/s
70 ans	Période de réversibilité	20 m³/s

I - Structure de données GIBIANE

Principe : faire supporter toute l'information à l'échelle du conduit

Forme : une arborescence de TABLE

1. Une TABLE « **réseau** » contenant autant de TABLE **de paramètres** (*valeurs*) que de conduit (noms en indice)
2. Pour chaque conduit, la TABLE **des paramètres** contient des données relatives à
 - **La géométrie** : diamètre, section, longueur, périmètre, épaisseur béton
 - **Les connectivités** : nom des conduits aval, entrée ou sortie réseau (LOGIQUE)...
 - **La modèle physique** : historique débits (LISTREEL), puissance, Reynolds
 - **Les maillages** : maillage solide (2Daxi), maillage fluide (1D), ligne amont et aval...

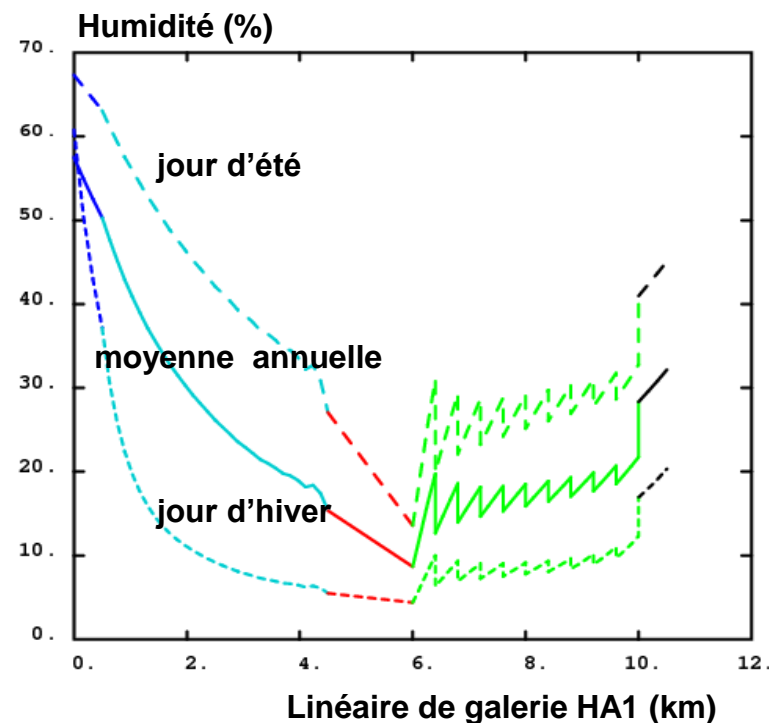
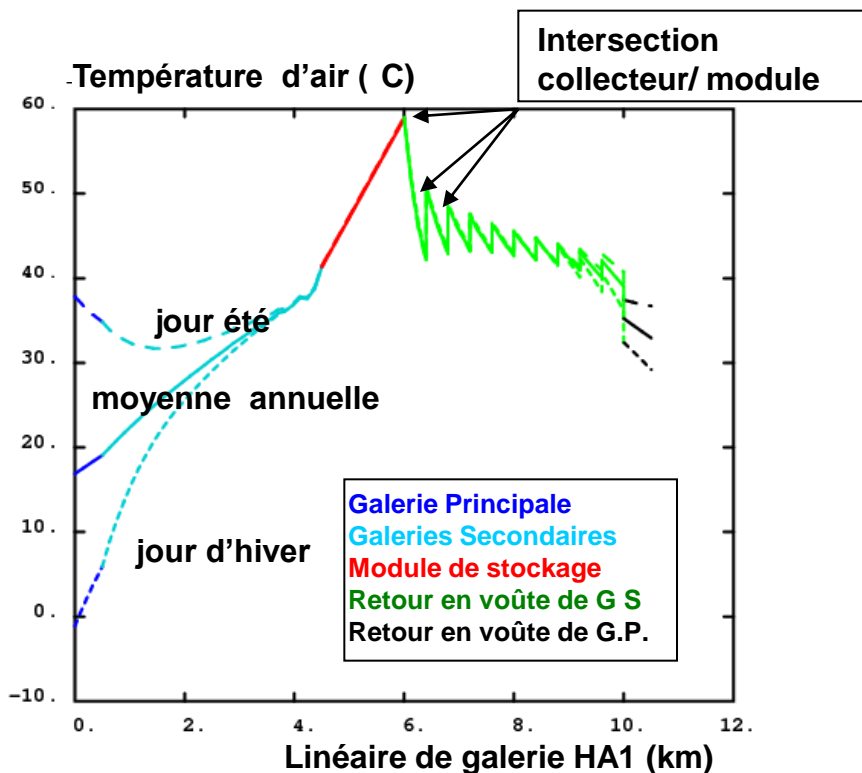
Les tables sont renseignées soit :

- **Via une interface conversationnelle** GIBIANE : description du réseau aéraulique...
- **par programmation** (boucle itérative, test, calcul) : maillages, coef. échanges actualisés
- directement **par l'utilisateur** : déclaration des conduits BiFlux...

I - Evolution avec les saisons : la zone HA

Résultats obtenus entre 70 et 72 ans - stockage HA en attente de fermeture

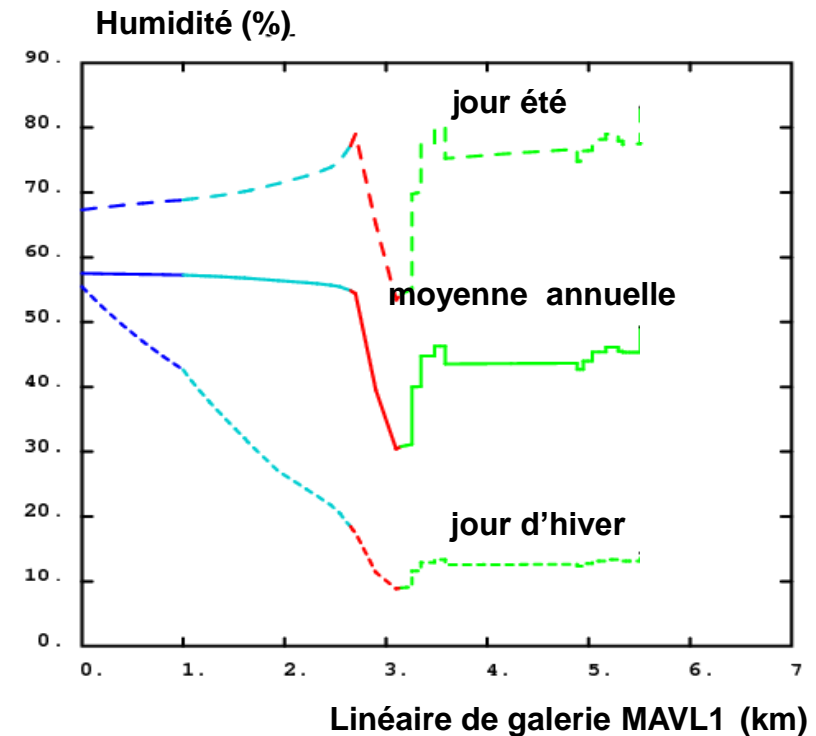
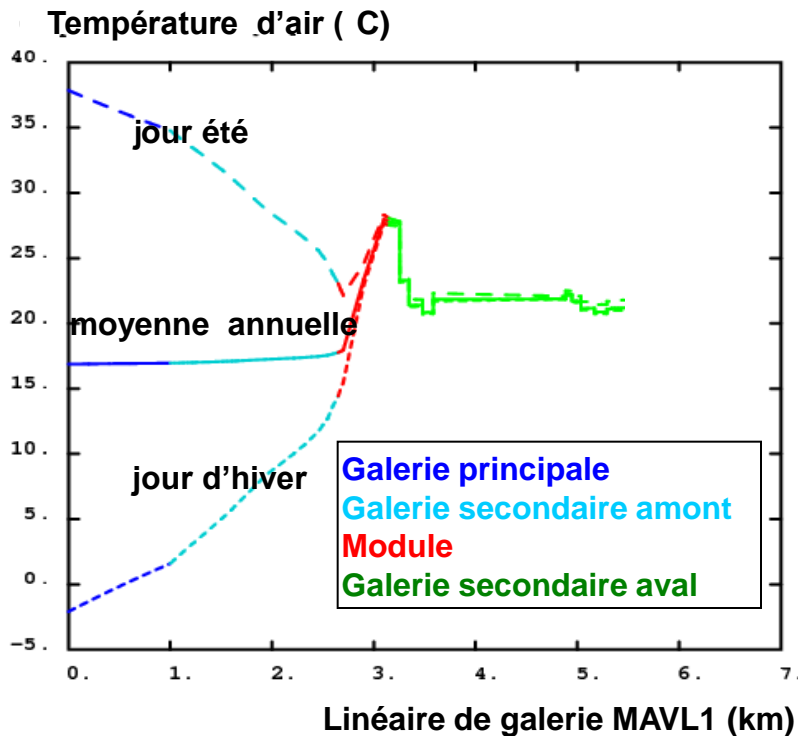
- En amont du module, l'air frais est chauffé par l'air nucléaire circulant en voûte de galerie
- Amortissement des variations climatiques de température par échange thermique mur
- En aval du module, l'air est très sec en toute saison



I - Evolution avec les saisons : la zone MAVL

Résultats obtenus entre 90 et 92 ans - stockage MAVL en attente de fermeture

- En amont des modules : **amortissement des variations climatiques** de température
- En aval des modules - **pas d'effet thermique important** des modules exothermiques (7/21)
- **effet important sur l'humidité**



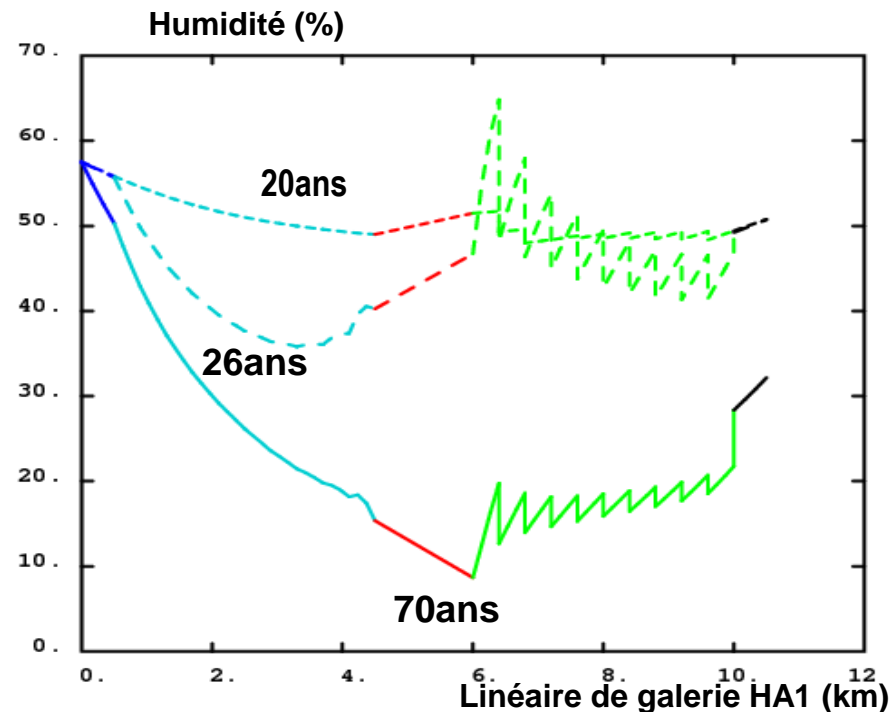
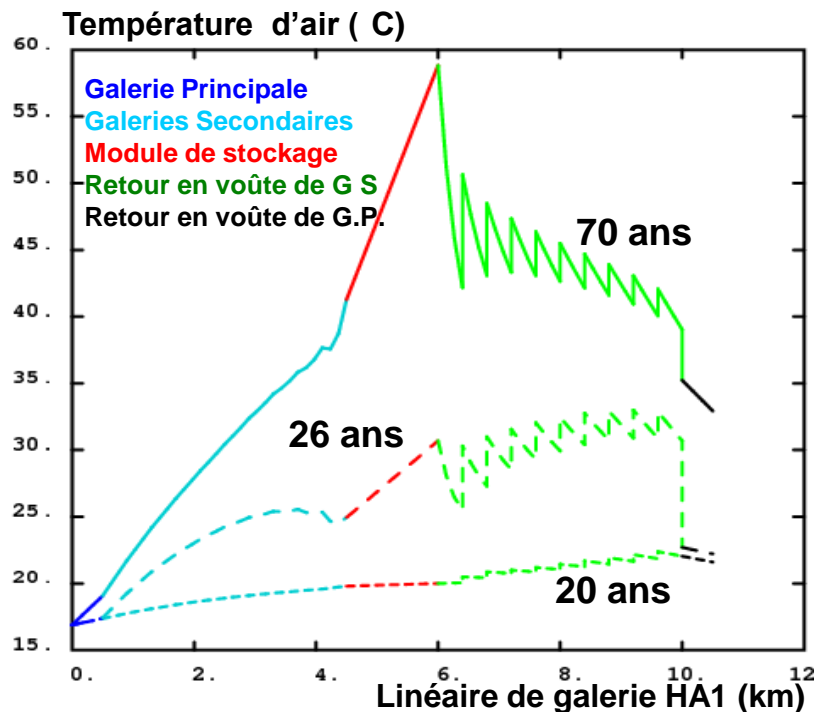
I - Evolution sur le temps d'exploitation : la zone HA1

2 ans
8 ans
20 ans
26 ans
70 ans

Remplissage 1^{er} module
1^{er} module en attente de fermeture
ventilation maximale
attente de fermeture généralisée
période de réversibilité

30 m ³ /s		aval modules :
92 m ³ /s		
104 m³/s	→	Tair faible
20 m³/s	→	Tair faible Hr fort
20 m³/s	→	Tair fort Hr faible

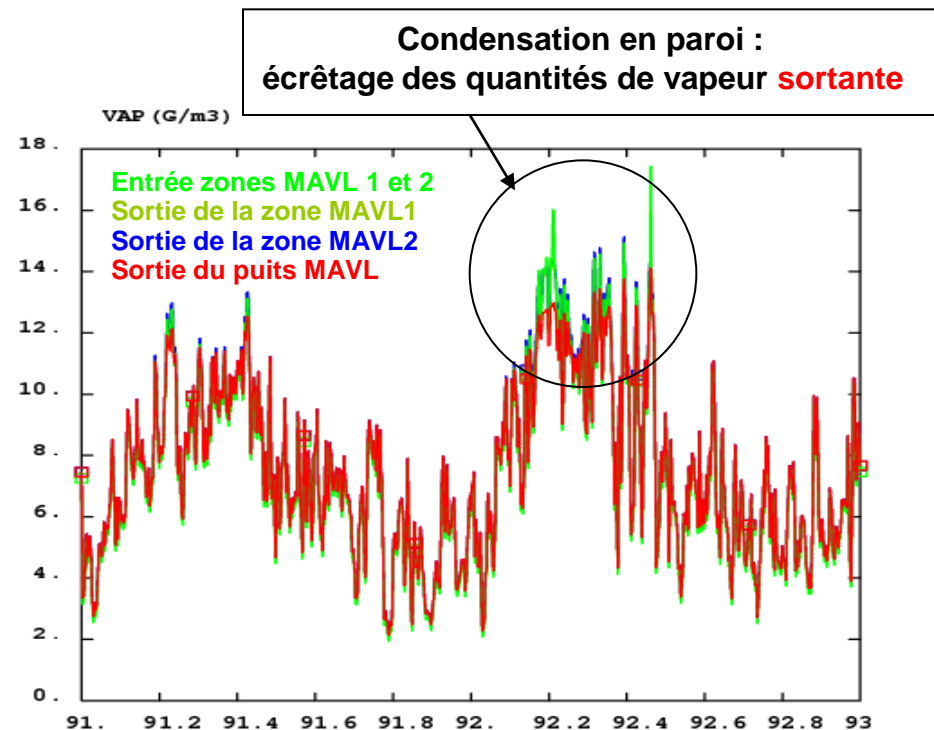
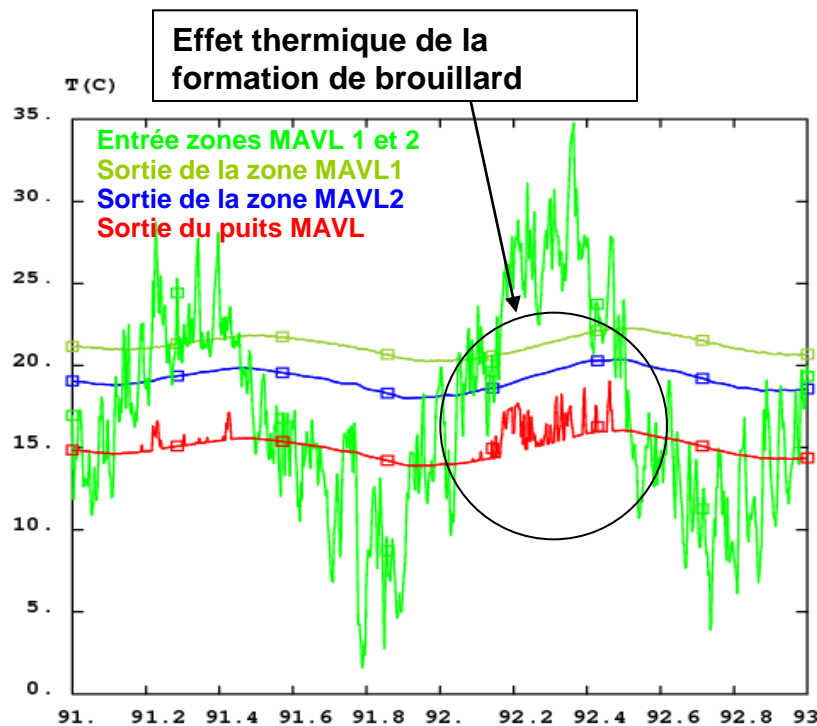
76 ans fermeture par scellement et remblaiement du stockage



I - Fluctuations climatiques et condensation en zone MAVL

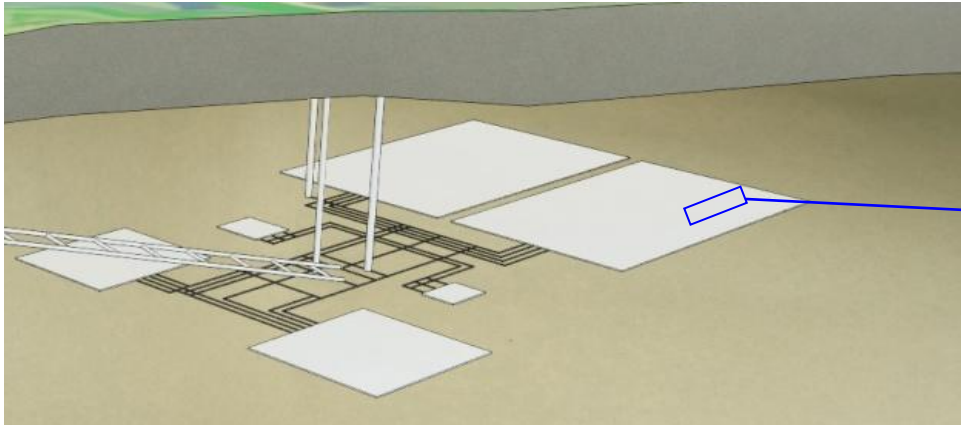
Les phénomènes de condensation dans le stockage sont printanier ou estival. Ils sont épisodiques et ont lieu :

- **En paroi** dans et en aval des modules les plus éloignés :
 → mur froid (emprunte thermique de l'hiver) + air chaud et humide
- **En brouillard** dans le puits de sortie
 → refroidissement de l'air par détente au cours de l'ascension)

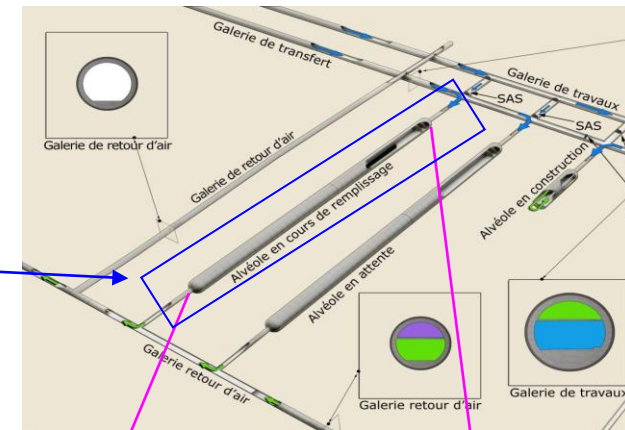


II - L'alvéole de déchets de Moyenne Activité Vie Longue

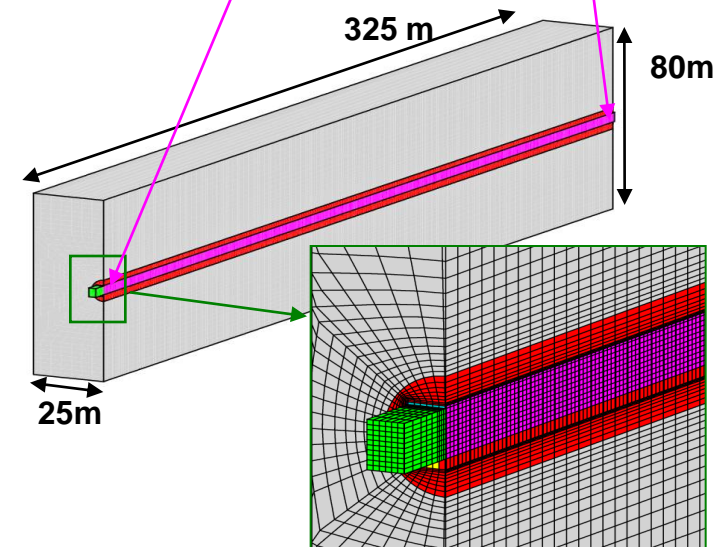
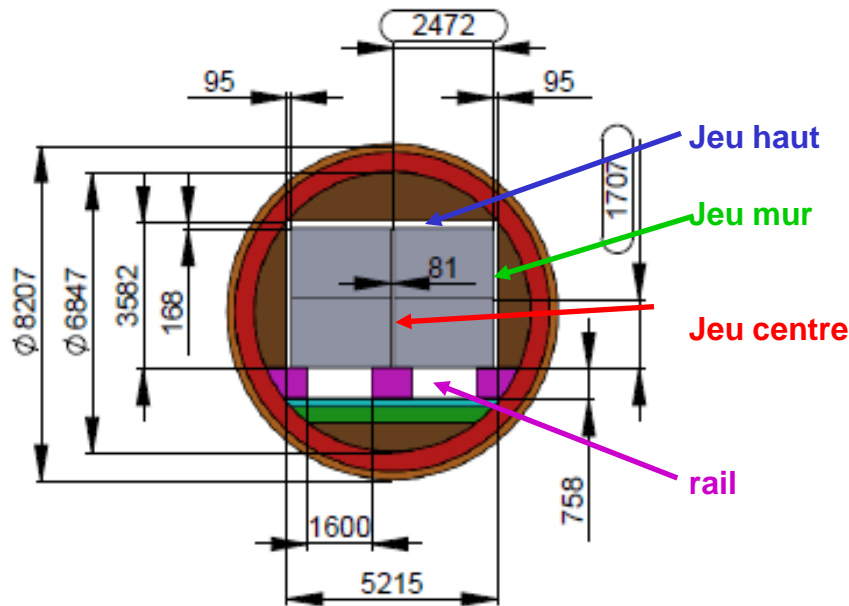
LE STOCKAGE (une architecture possible)



MODULE MAVL



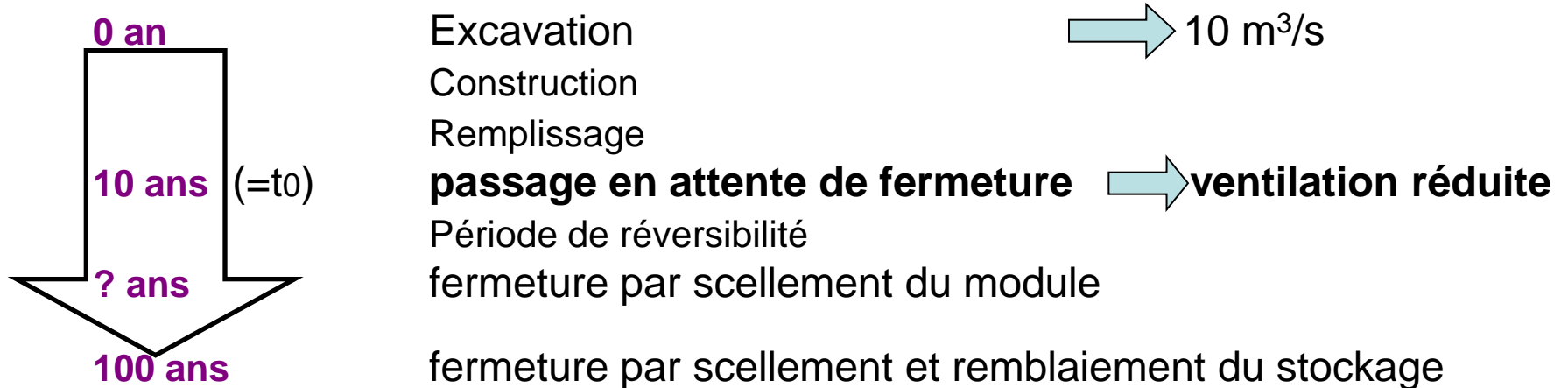
SECTION D'ALVEOLE
Avant projet ANDRA 2009



MAILLAGE DU DOMAINE DE CALCUL

II - La problématique

Exploitation du module de stockage :



Questions :

Pour les alvéoles contenant des déchets exothermiques, quels sont,



- ➡ les niveaux de température atteints?
- ➡ les niveaux de gradient thermique dans les bétons ?
- ➡ l'influence des choix d'exploitations sur les conditions ambiantes ?
(débits, pose de déflecteur de courant)

II - Modélisation de l'aéraulique

Problème : contraste important entre les dimensions du domaine d'étude

- Diamètres hydrauliques < 1m
 - longueur du domaine > 300 m
- } Ecoulement régi par les pertes de charges à l'échelle métrique

2 Modèles envisagés :

1. NS+k-e  très gros maillages (~10⁷ mailles) : abandonné
2. **Ecoulement à potentiel en réseau de plans fluides**  ~10⁵ mailles

PRINCIPE DE LA SIMPLIFICATION DU MODELE PHYSIQUE

Navier-Stokes equations + turbulence modelling

$$\underbrace{\nabla(P)}_{\text{Volume forces}} - \rho g + \underbrace{\rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V \right) - \nabla \cdot (\mu + \mu_T) \nabla V}_{\text{Inertial and friction forces with turbulence effects.}} = 0$$

$$\underbrace{\nabla(P) - \rho g}_{\text{Modèle de Pertes De Charge}} - \underbrace{\mathbf{l}_s \cdot \frac{\rho V}{2}} = 0$$

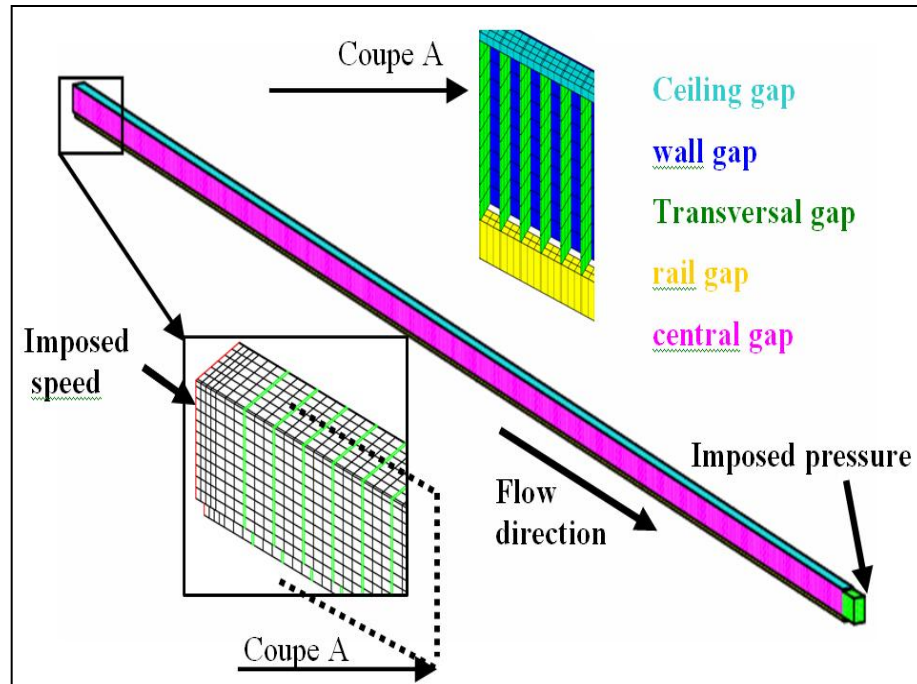
tenseur de pertes de charge :

$$\mathbf{l}_s = \frac{\zeta_f}{D_h} + \begin{bmatrix} \zeta_{11} & & \\ & \zeta_{22} & \\ & & \zeta_{33} \end{bmatrix}$$

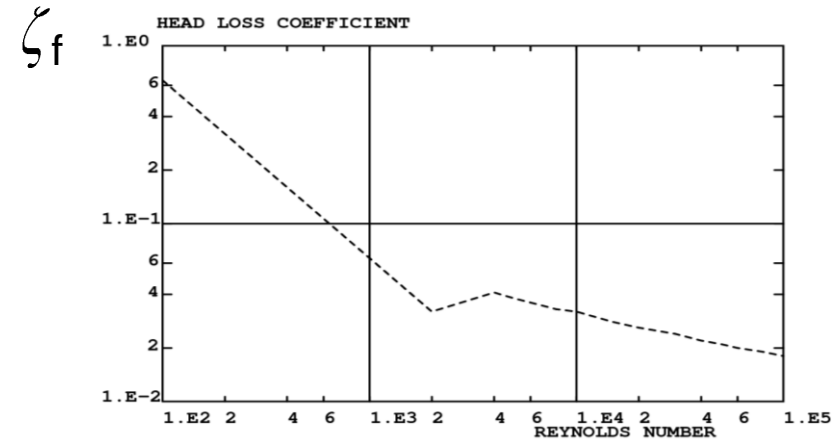
(Idel'cik + validation / NSKE)

II - Modélisation des pertes de charge

DISCRETISATION SPATIALE DU FLUIDE (1/2 alvéole)



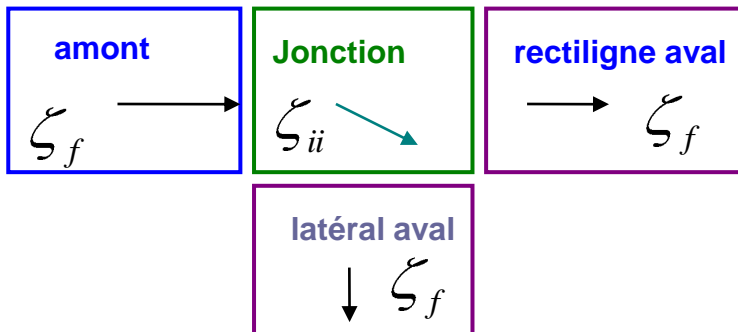
1. Pertes de charge régulière



2. Réunion de courant

$$\zeta_{straight}^g = \frac{1}{L_{straight} V_{straight}} \left(1.55 \frac{Q_{lat}}{Q_{main}} - \left(\frac{Q_{lat}}{Q_{main}} \right)^2 \right)$$

MAILLAGE DE L'INTERSECTION DES JEUX

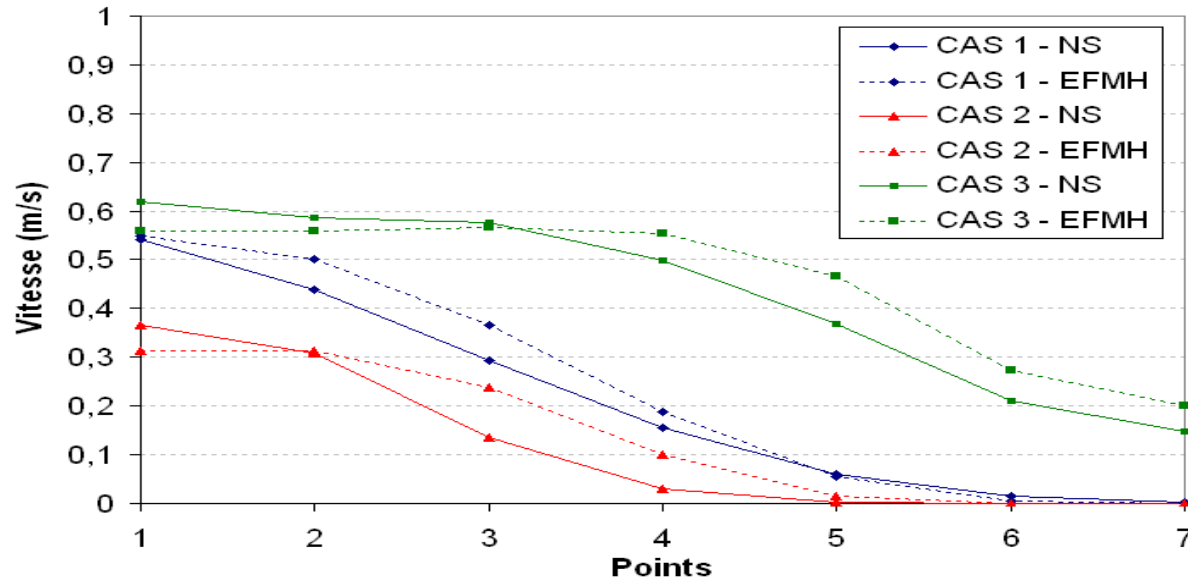
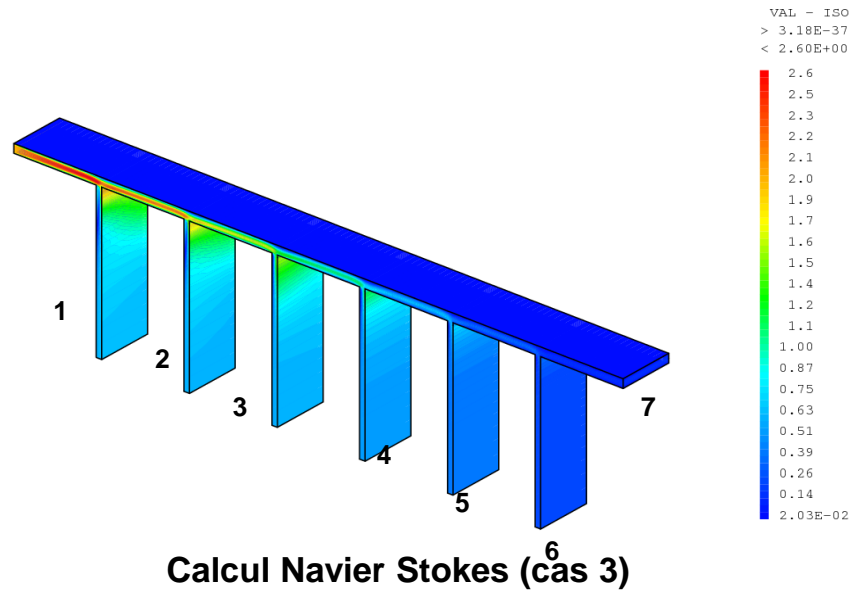
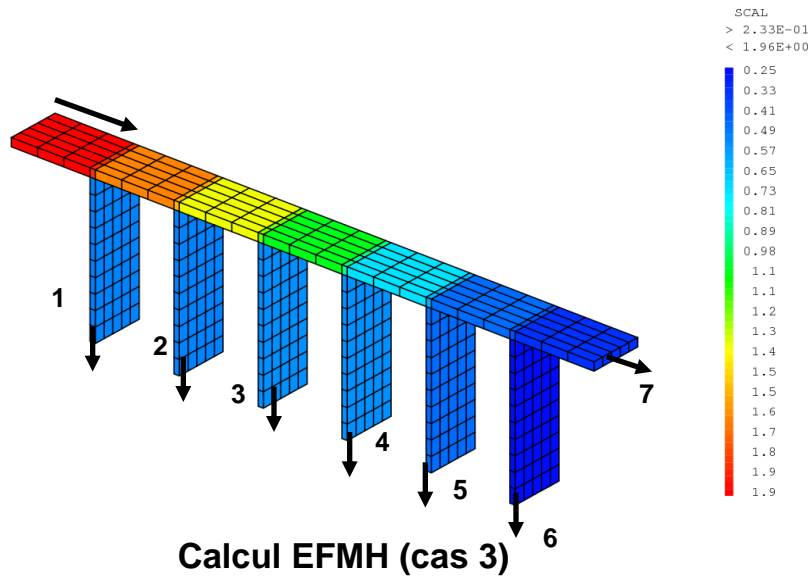


3. Séparation de courant

$$\zeta_{lat}^{split} = \frac{1}{L_{lat} V_{lat}} \left(V_{main} - V_{lat} \right)^2$$

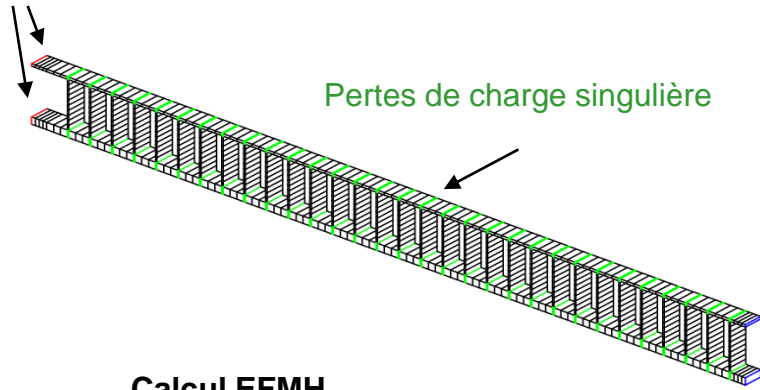
$$\zeta_{straight}^{split} = \frac{0.4}{L_{straight} V_{straight}} \left(V_{main} - V_{straight} \right)^2$$

II - Validation des pertes de charge : séparation de courant en 2D



II - Validation du modèle de PDC complet (30 rangées)

Vitesse imposée

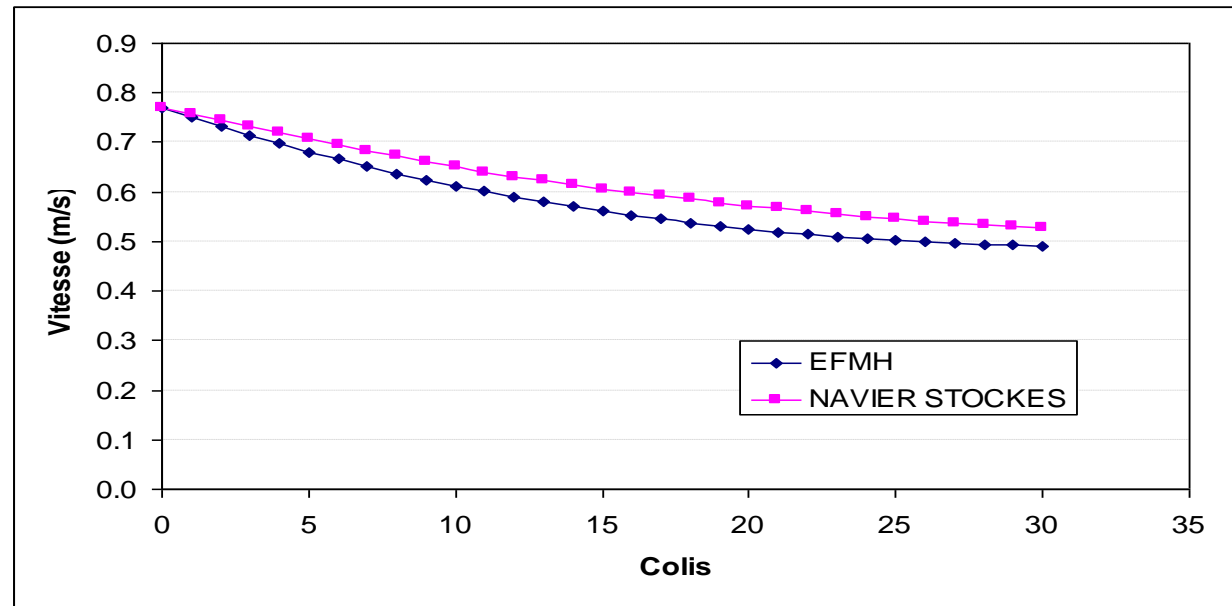


Calcul EFMH

Vitesse imposée



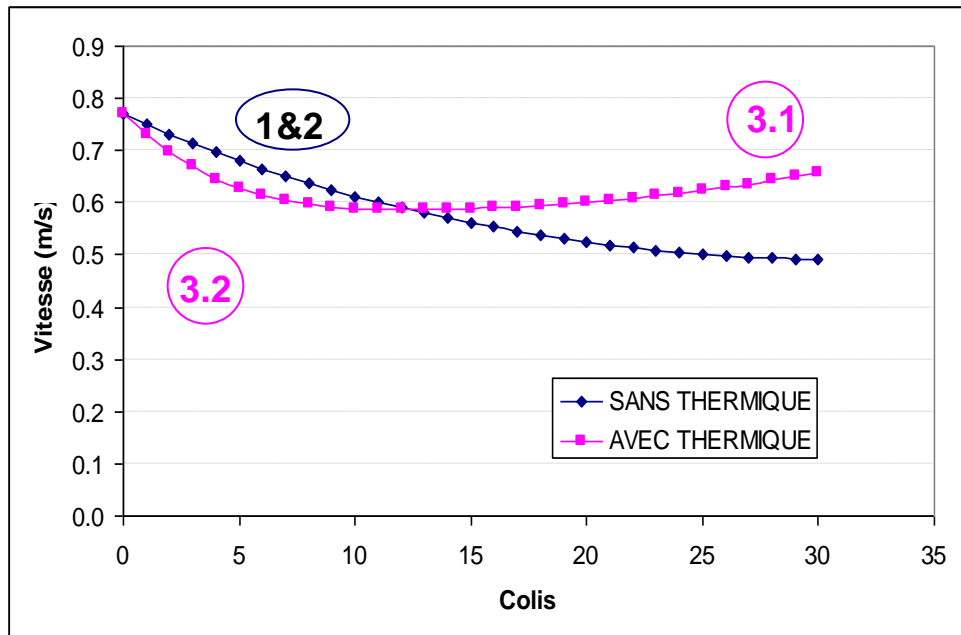
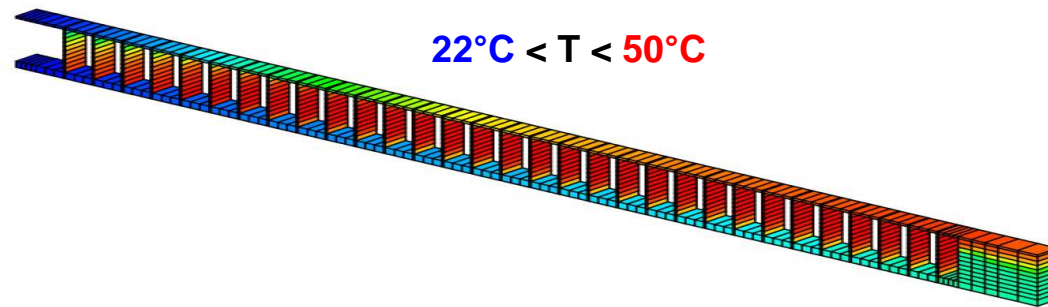
Calcul Navier Stokes



Évolution de la vitesse le long du jeu haut

II - Test du couplage thermique

Modèle thermique fluide : transport de la chaleur (TRANGEOL) + source uniforme



Évolution de la vitesse le long le jeu haut

DYNAMIQUE DE L'ÉCOULEMENT

1. Effet de friction (moteur)

$$Dh \text{ Jeu haut} < Dh \text{ Jeu bas}$$



Jeu haut \longrightarrow Jeu bas

2. Effet d'inertie (modérateur)

L'inertie du fluide contrarie les changements de direction

3. Effet cheminée (moteur)

3.1. Forces de flottabilité en aval :



Jeu haut \longleftarrow Jeu bas

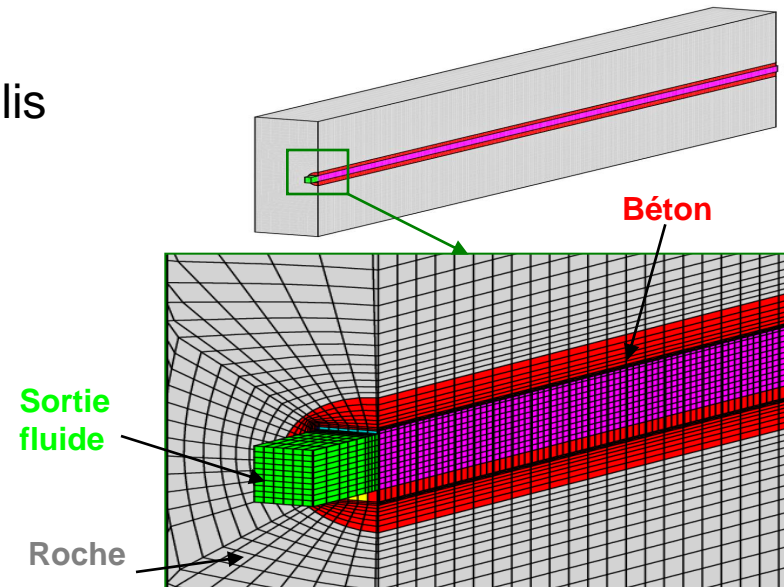
3.2. Tirage en amont

Jeu haut \Longrightarrow Jeu bas

II - Modélisation de la thermique fluide et solide

Problème : Températures et vitesses après 4 ans?

1. *Solide* : Conduction dans roche, béton et colis
Rayonnement face à face ($E=0.9$)
Déchets exothermiques
2. *Fluide* : Transport par l'air
3. *Couplage thermique* : Echange convectif
(Colburn, Mac-Adams)



Modèle :

1. *Solide* : Rés EQEX/EXEC en EF - échanges radiatifs ➔ Conductivité jeux
2. *Fluide* : Rés. TRANGEOL en VF ou EFMH
3. *Couplage* : Formulation volumiques des échanges convectifs dans les jeux

II - Analyse phénoménologique des conditions de ventilation

Paramètres de l'étude

	Référence	Sensibilité
• Puissance thermique / colis :	7,5 W	14 W
• Débit de ventilation :	3 m³/s	0,3 m ³ /s
• Période de fermeture rail :	0	10/20 rangées

Analyse de Richardson : convection forcée (CF) ou naturelle (CN)?

$$Richardson = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot h}{V^2}$$

et $\Delta T(x) = x \cdot \Delta T(L) / L$

avec $\Delta T(L) = 30^\circ C$ et $L = 325 m$

$V = 0,7 m/s ; Ri(L) = 7 \Rightarrow CF + CN$
 $V = 0,07 m/s ; Ri(L) = 700 \Rightarrow CN$

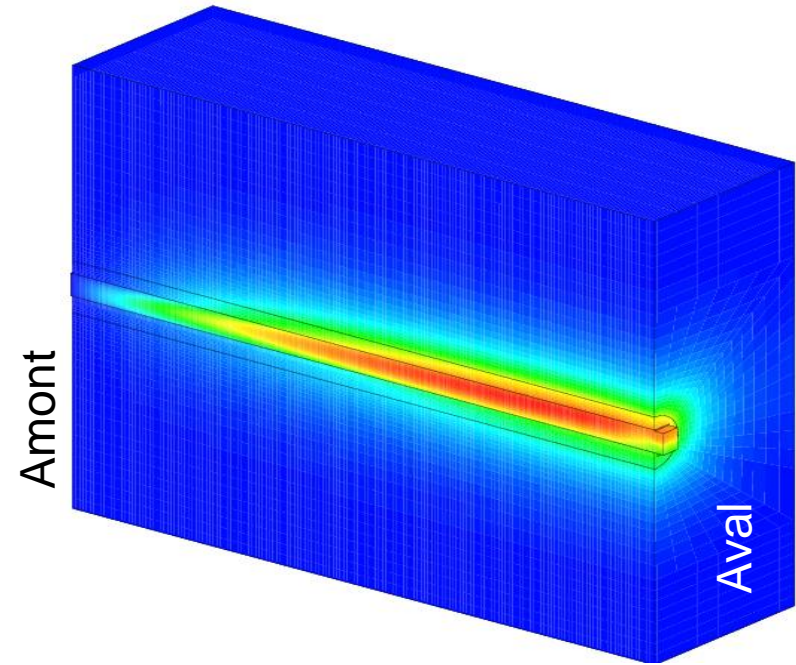
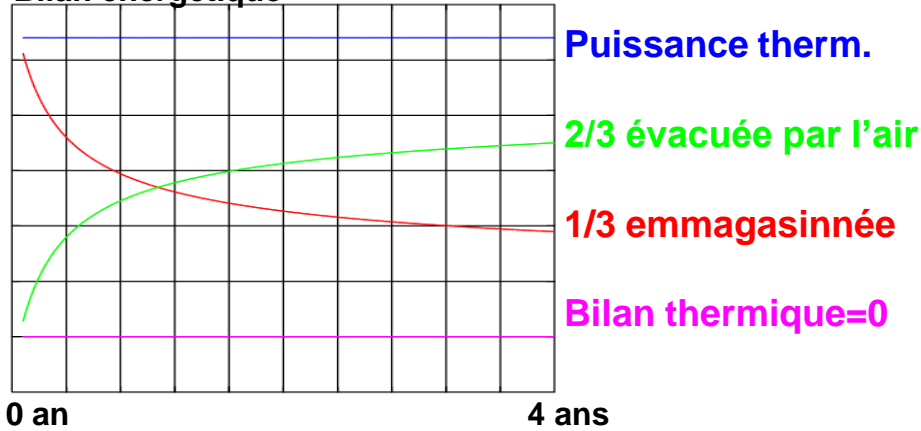
Analyse de Fourier et de Courant : quels sont les temps phénoménologiques ?

- Pour traverser un jeu d'air : 10 s
- Pour parcourir le module : 1 heure
- Pour traverser 1 mètre de béton : **7 jours** \Rightarrow pas de temps

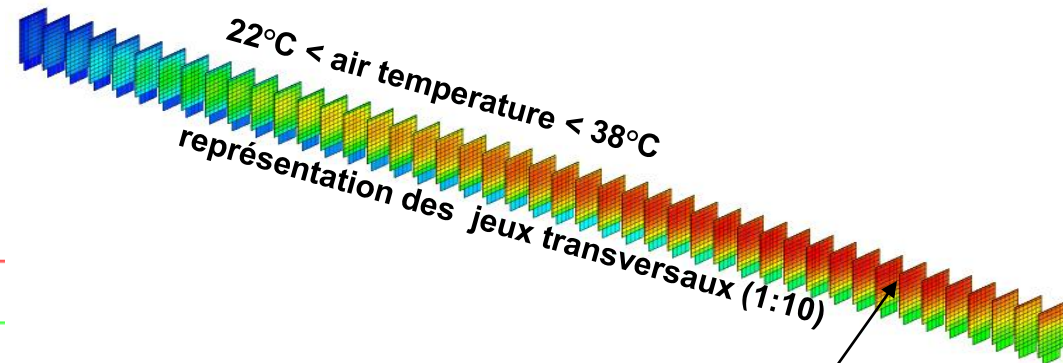
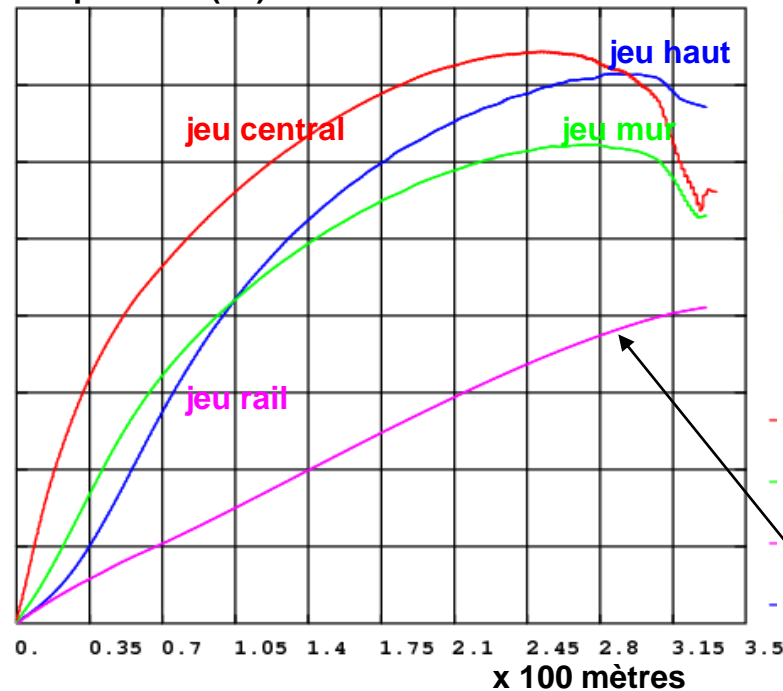
Calcul pseudo permanent dans l'air et transitoire dans le massif

II - Cas de référence : résultats thermiques

Bilan énergétique



Temperature (C)



L'air frais des rails alimente la convection naturelle : apparition d'une stratification thermique

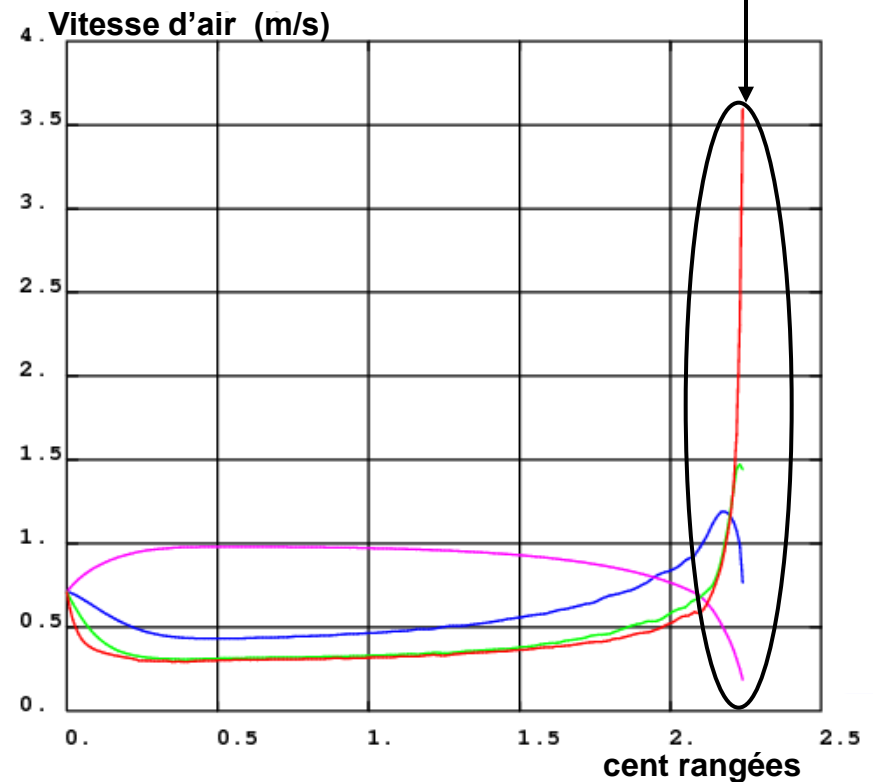
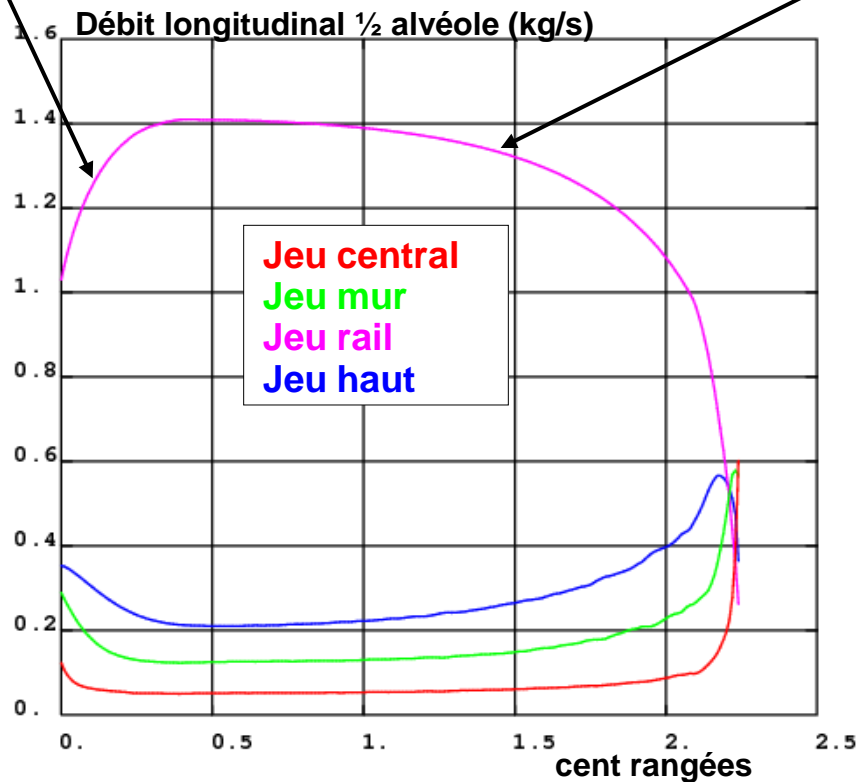
II - Cas de référence : résultats aérauliques

Vitesses moyennes et débits par jeux

Les rails collectent l'air provenant des autres jeux longitudinaux

...mais la convection naturelle contraint l'air frais à y retourner au delà de la centième rangée.

En sortie, les jeux longitudinaux extérieurs (mur, rail et haut) sont partiellement occultés : L'air est dévié vers le jeu central.

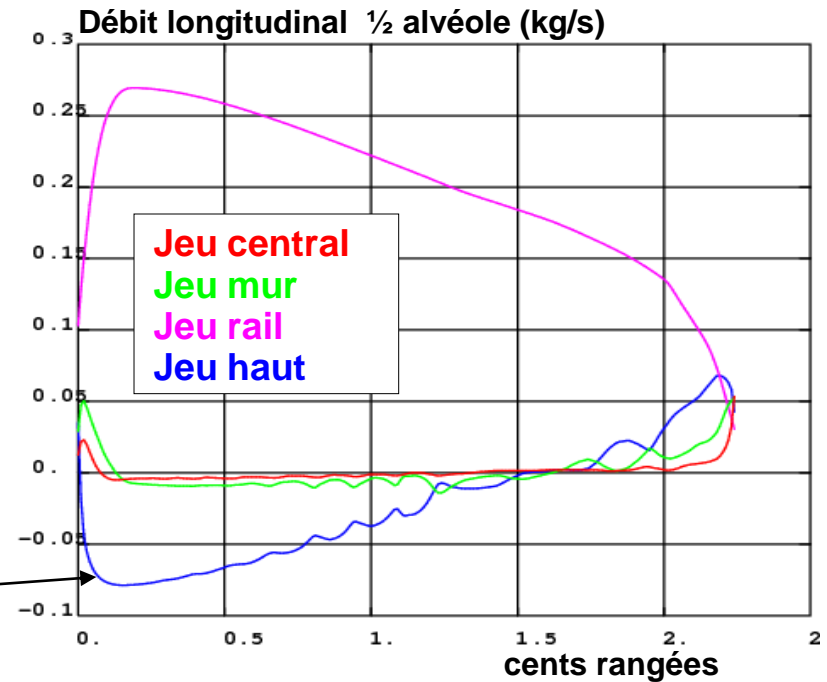
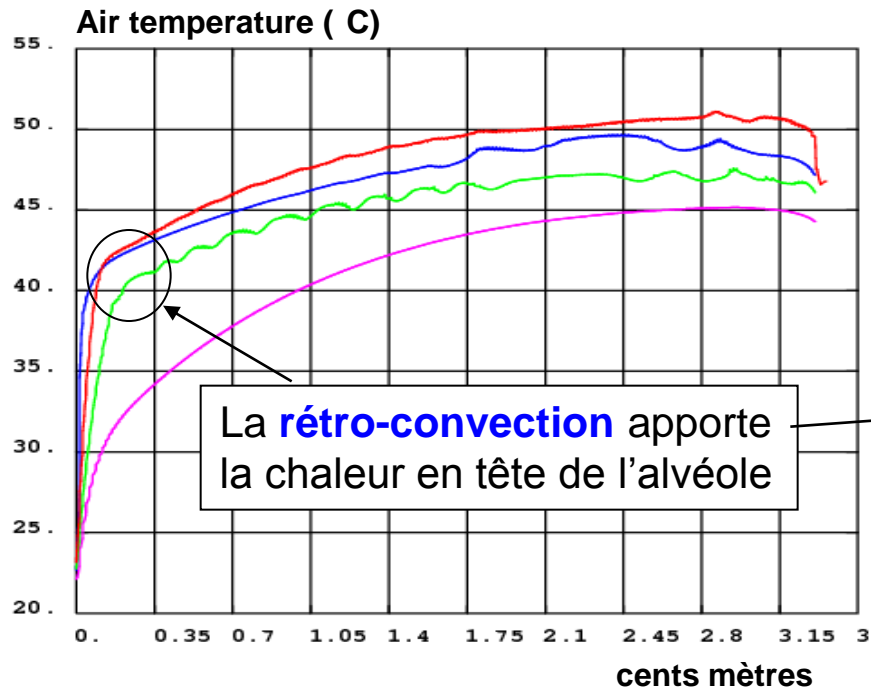


II - Ventilation faible

Paramètre de l'étude : la ventilation est réduite par 10

Après 4 ans :

- 14% de la chaleur évacuée par l'air (Réf :2/3),
- la température atteint 52°C (Réf 38°C)

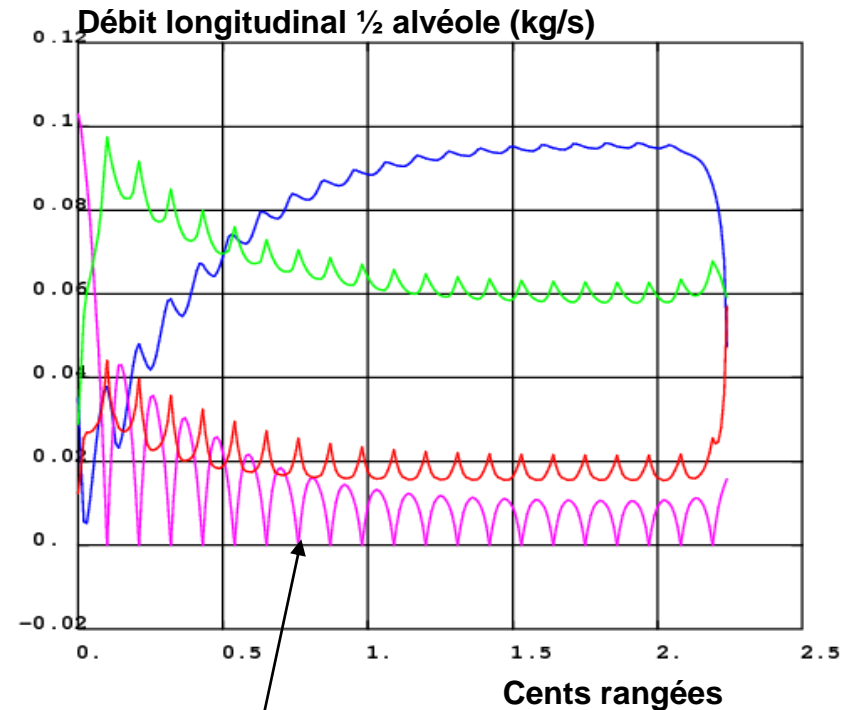
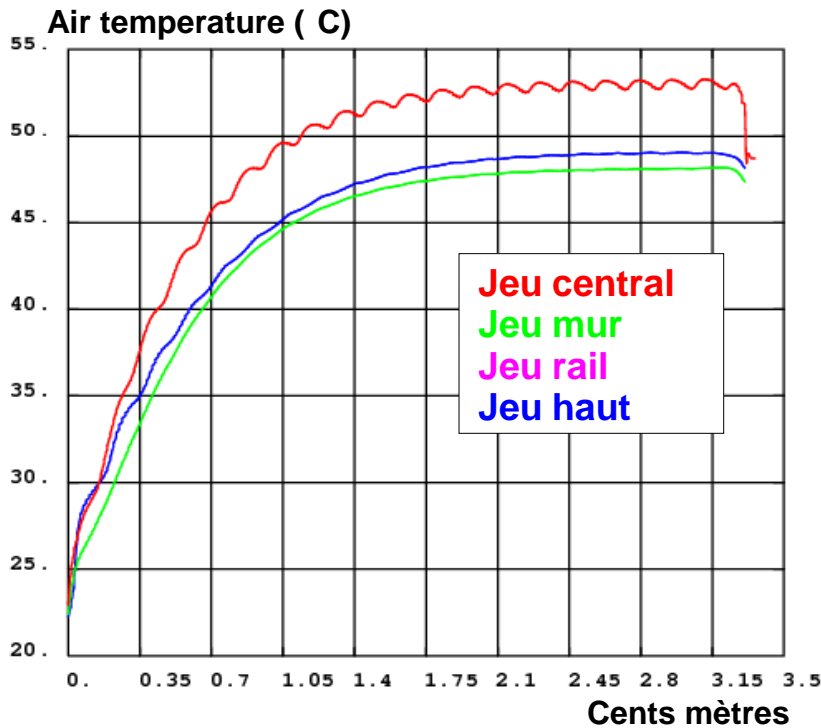
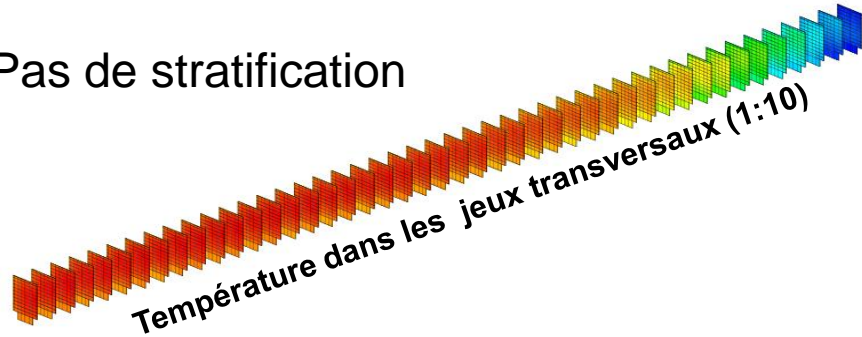


Elévation de la température modérée par plus de surface efficace d'échange thermique

II - Fermeture des sections et ventilation réduite

Paramètre de l'étude : fermeture des sections toutes les 10 rangées

Pas de stratification

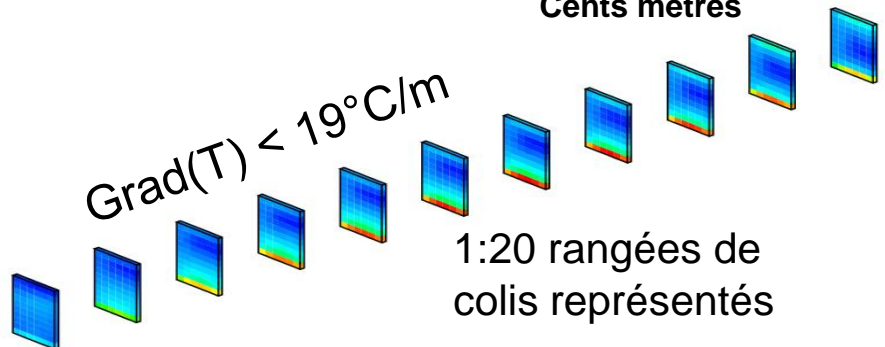
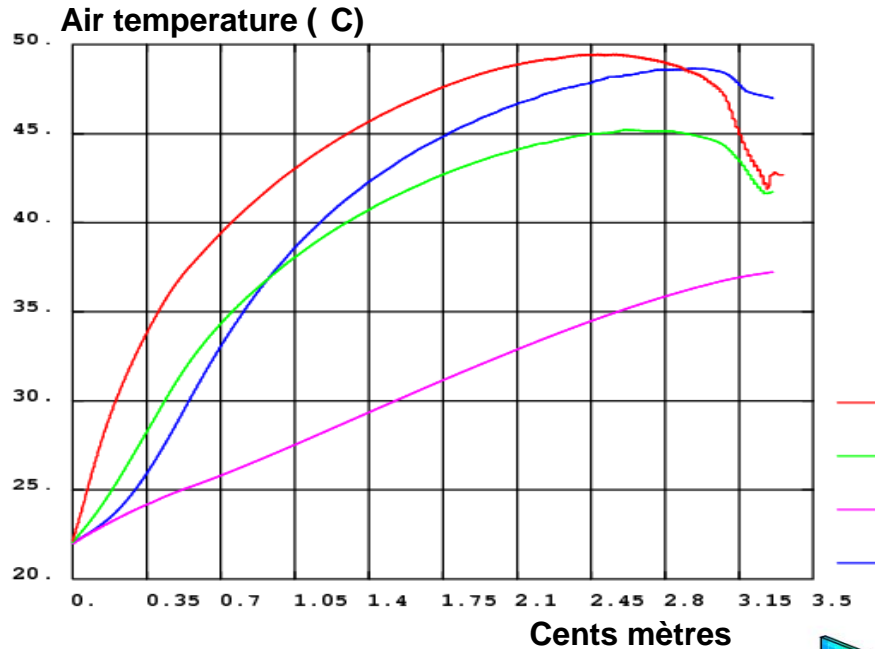


Fermeture des rails:
Déviation de l'air vers les jeux supérieurs
via les jeux transversaux

II - Ventilation forte et puissance forte

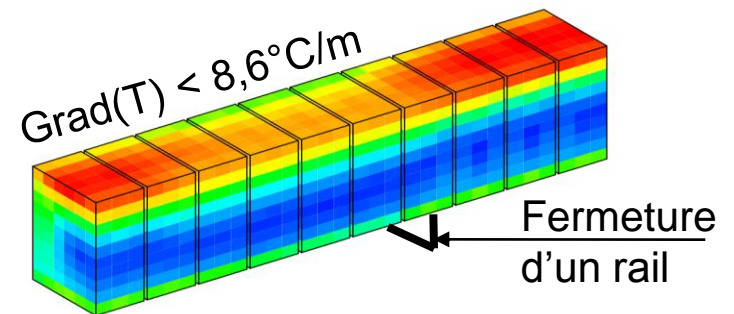
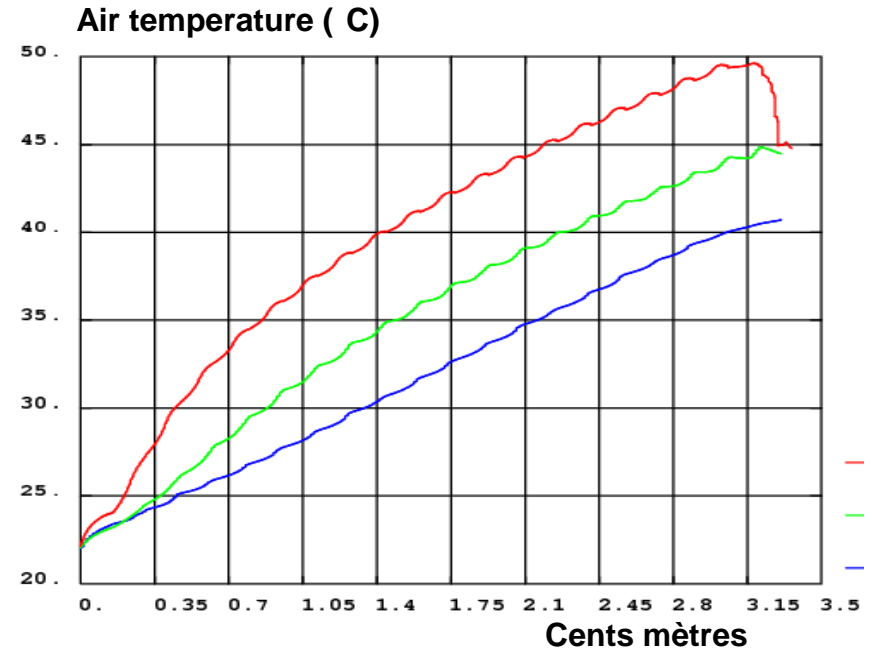
Sans fermeture de section

Gradient thermique élevé dans les bétons colis



fermeture des rails toutes les 10 rangées

gradient thermique plus faible – même niveau de température



Conclusion

Les + de Cast3M pour traiter **l'étude I :**

Grâce à GIBIANE, nous avons pu élaborer et utiliser,

- **Une interface conversationnelle dédiée GIBIANE**
- **Une structure de données dédiée**
- **Un schéma de transport en réseau 1D**

Les + de Cast3M pour traiter **l'étude II:**

Grâce à la « boîte à outil numérique de Cast3M »

- **Construire des modèles physiques et numériques originaux**
- **Comparer des modèles physiques (perte de charge, NSKE)**
- **Comparer des méthodes numériques (EFMH, VF,EF, EXEC, TRANGEOL)**

Les + de Cast3M que nous apprécions toujours :

Une même plate-forme pour

- **Le maillage, le post-traitement, la modélisation et la résolution**
- **L'utilisation d'objets évolués (CHPOINT, LISTREEL,.....)**
- **Le développement d'algorithmes de résolution et de structures de données**