

# Modèle d'évacuation de foule pour des structures multi-locaux à partir de la gestion de la congestion aux seuils de portes

*Par*

*Anthony COLLIN et Alexis MARCHAND*

*Laboratoire Energies Mécanique Théorique et Appliquée – Université de Lorraine – CNRS*



*GDR « Feux » - Jeudi 06 juin 2019, Marseille*

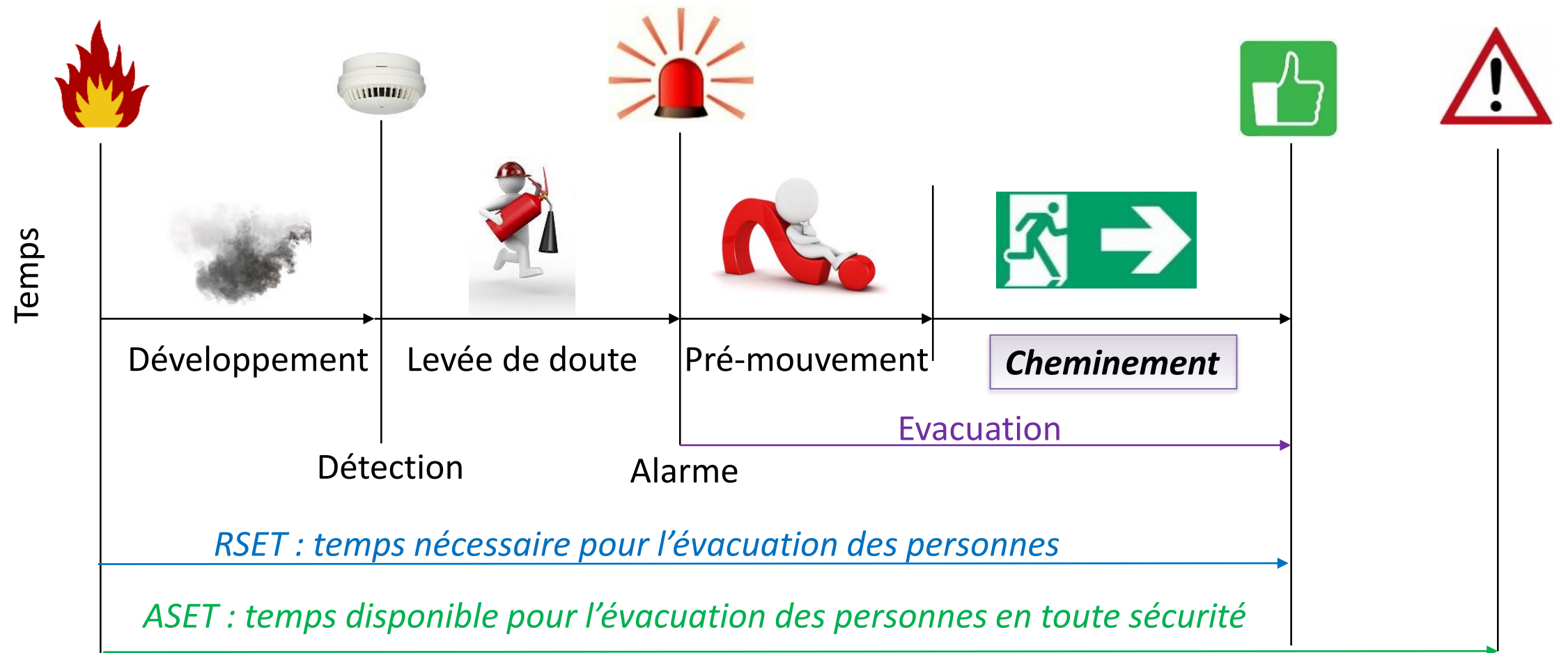
## Objectifs de l'étude :

- Déterminer les temps d'évacuation pour de grands ensembles bâtimentaires (navires, immeubles de grande hauteur)



## Enjeux pour l'évacuation :

- L'évacuation des personnes se déroule en toute sécurité si  $RSET < ASET$



Représentation des temps d'évacuation

## Modèle microscopique : Echelle d'un « agent »

- Description du mouvement de chaque personne en train d'évacuer, au travers d'un bilan de forces (force sociétale, pariétale, ...)
- Travaux de Helbing *et col.* / Logiciels : PathFinder, FDS + Evac, PedGo, ...

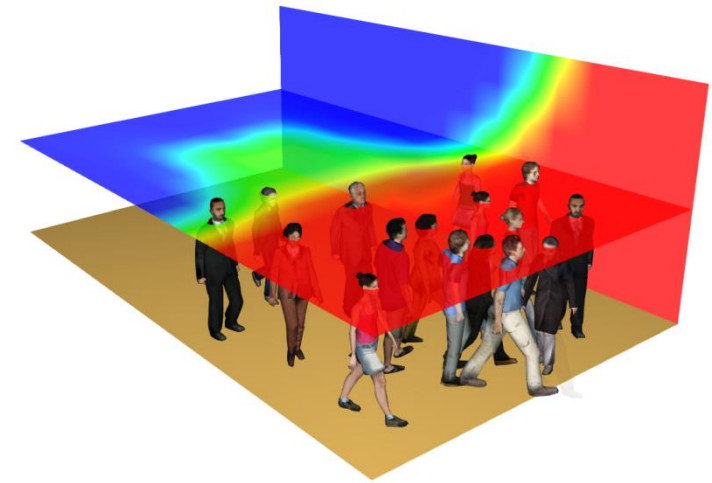
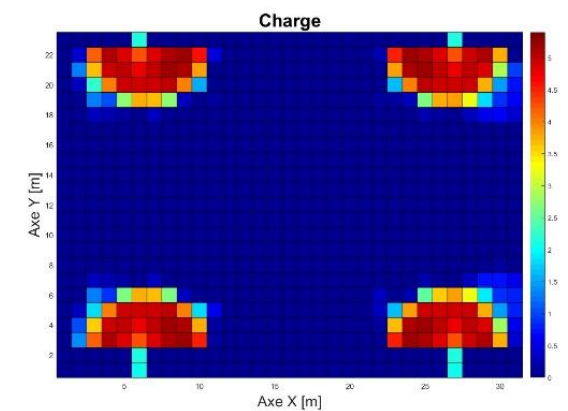


Illustration de PathFinder

## Modèle macroscopique : Echelle d'une foule (agents indissociables)

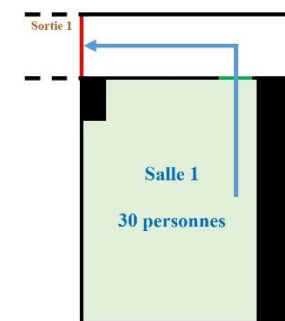
- Evolution d'une densité de personnes [Pers/m<sup>2</sup>] selon une équation bilan de transport ;
- Travaux de Hughes *et col.*, Colombo *et col.*, Bellomo *et col.*, ...
- LEMMA : code Marcoe-Paulo (thèse T. Gasparotto)



Marcoe Paulo : Champ de densité de personnes

## Modèle mésoscopique : Echelle d'une pièce (foule et pièce indissociables)

- Estimation d'un temps de sortie fonction de la quantité de personnes au sein du local et du débit maximal à la porte ;
- Travaux de Togawa, Pauls, ...

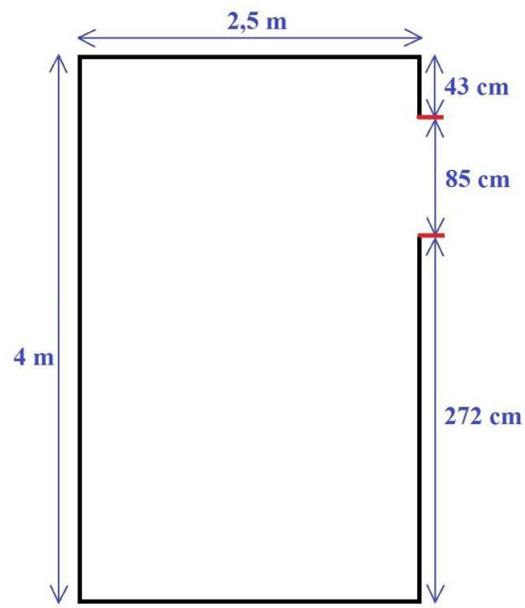


Application du modèle de Togawa sur une seule pièce

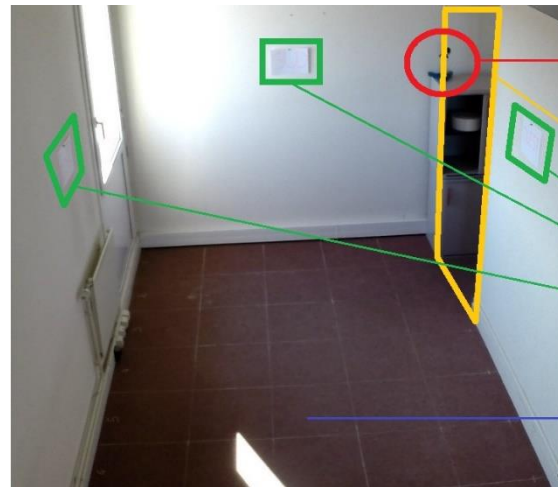
## Essais expérimentaux montrant le phénomène de congestion :



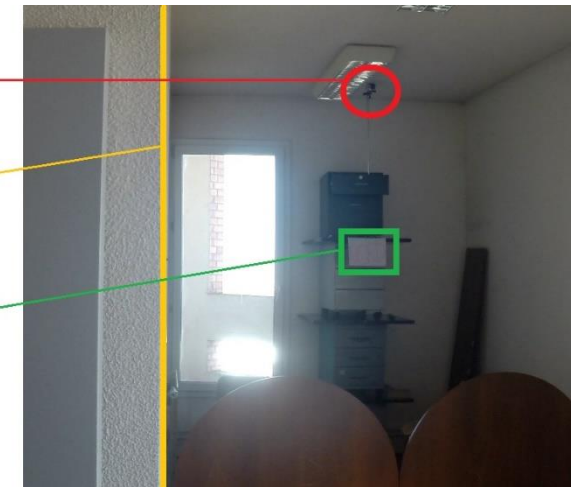
Image d'un essai d'évacuation



Plan de masse de la salle

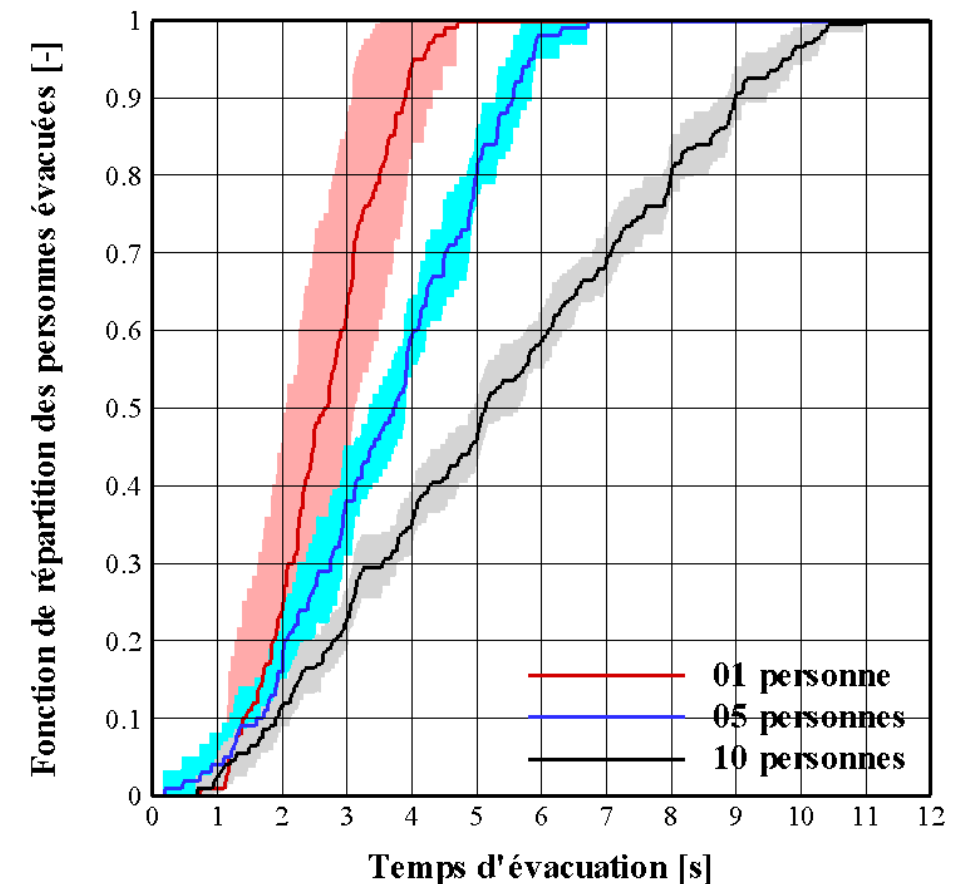


Protocole d'essais

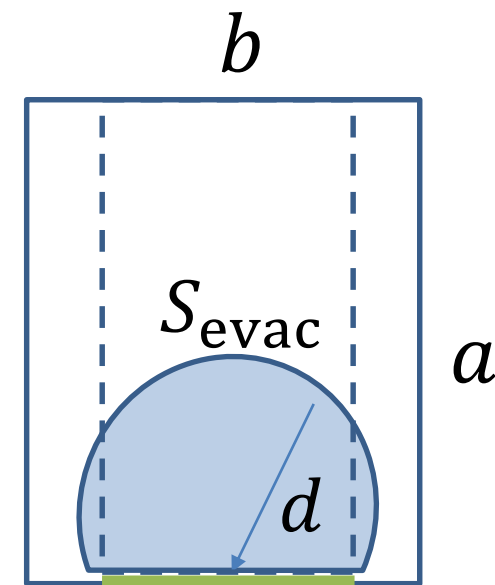


Protocole d'essais

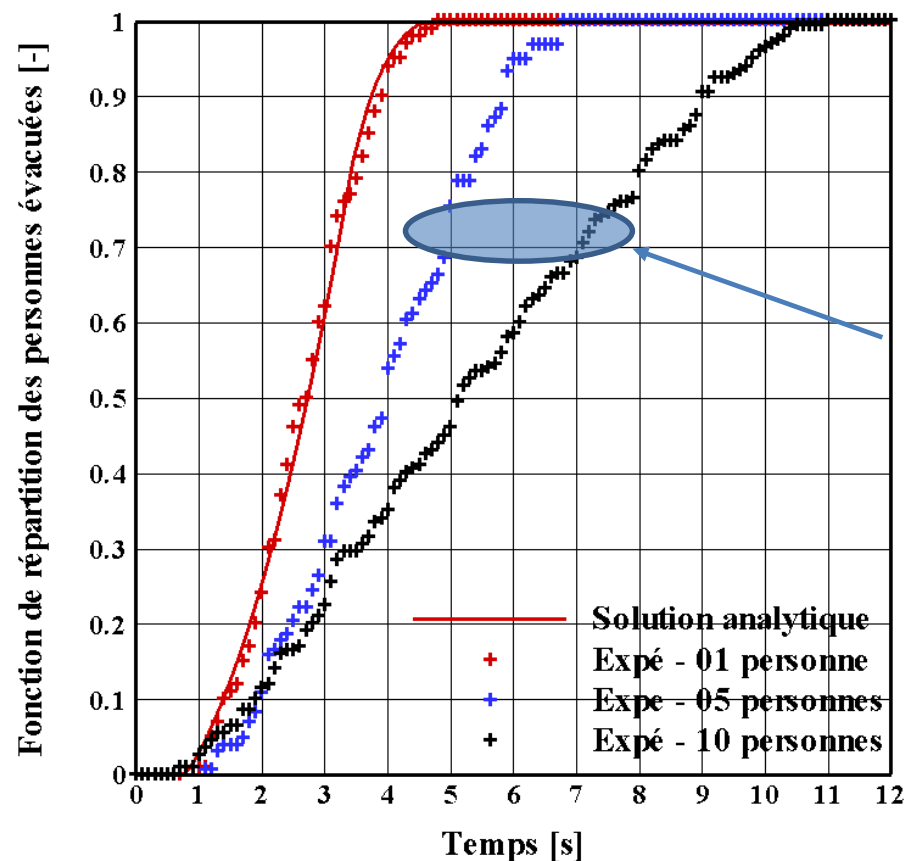
- Expériences instrumentées (caméras) ;
- Protocole d'essais établi (positionnement et orientation) ;
- Essais réalisés avec 1, 5 et 10 personnes répétés respectivement 100, 20 et 20 fois ;
- Effet net du phénomène de congestion qui intervient assez rapidement lorsque la pièce se « charge » en occupants ;



Répartition des personnes sorties en fonction du temps

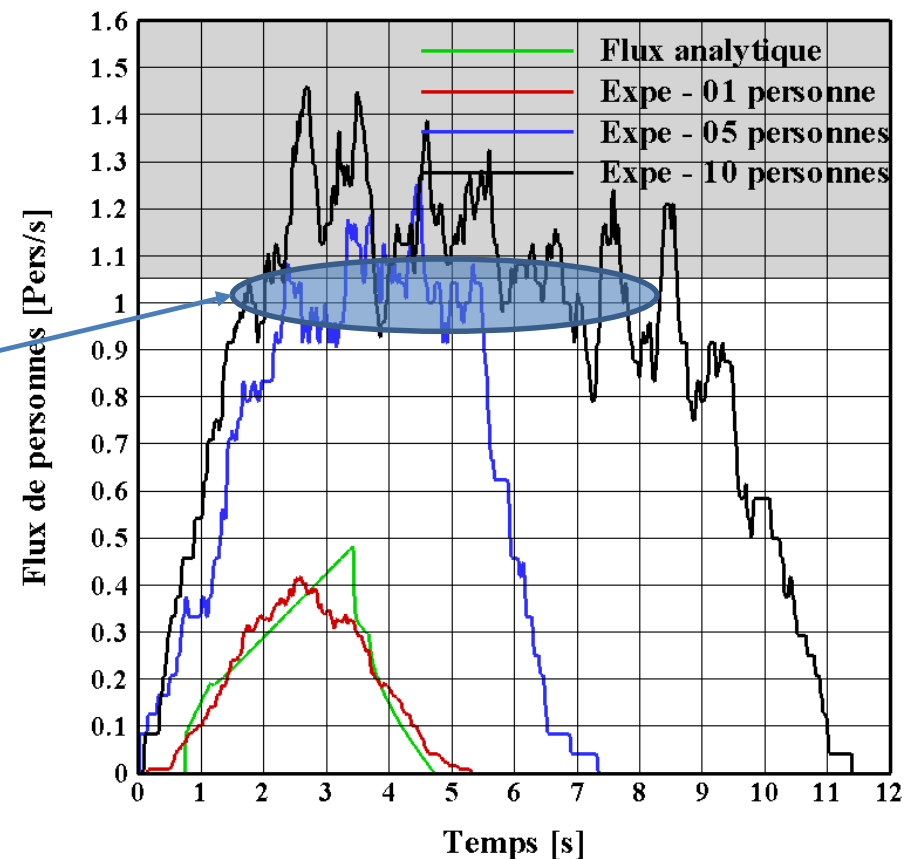


- Calcul analytique de la fonction de répartition :  $F(t) = \frac{S_{evac}(t)}{S}$  avec  $d = V_0 t$
- Solution du problème,  $a > b$  (sinon  $a \leq b$ ) :  $F(t) = g(a, b, V_0, t_{réac})$
- Flux de personnes aux seuils de portes :  $\varphi(t) = \frac{dF(t)}{dt} = h(a, b, V_0, t_{réac})$
- Confrontation aux essais expérimentaux : 2 paramètres à identifier :  $V_0$  et  $t_{réac}$



Répartition des personnes sorties en fonction du temps

Apparition de la congestion



Flux seuil :  
1,05 Pers/s,  
1,16 Pers/s/m

Paramètres :  $V_0 = 0,93 \text{ m/s}$  et  $t_{réac} = 0,74 \text{ s}$

## Modèle mésoscopique : Echelle de la pièce

- Travail de Togawa à l'échelle d'une pièce :  $t_{RSET}$

$$t_{RSET} = \frac{L_{\max}}{V_{\text{marche}}} + \frac{N_{\text{personnes}}}{\varphi_{\max} l_{\text{porte}}}$$

Terme de transit  
vers la sortie

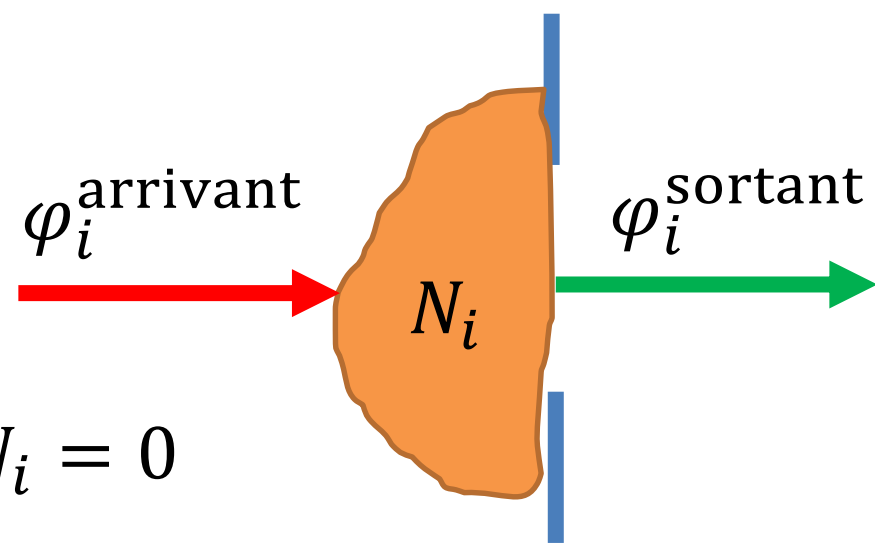
Terme de congestion qui  
peut devenir important

- Idée : étudier la congestion (ou engorgement) à chaque passage de porte

Maury et al., ESFSS, 2018

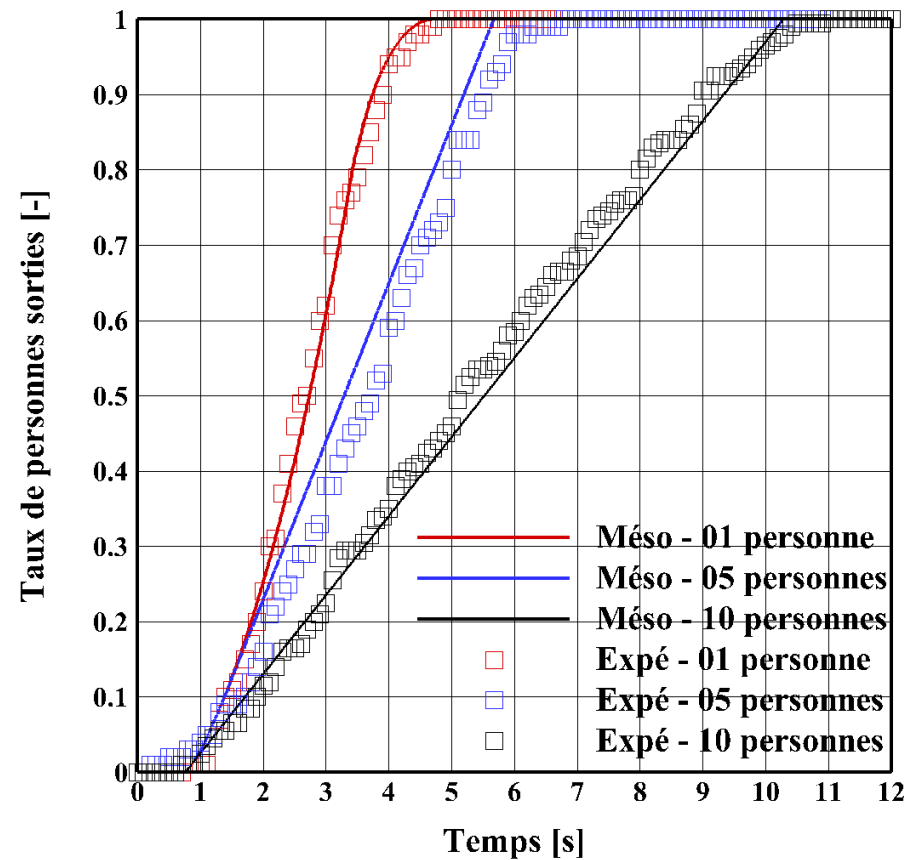
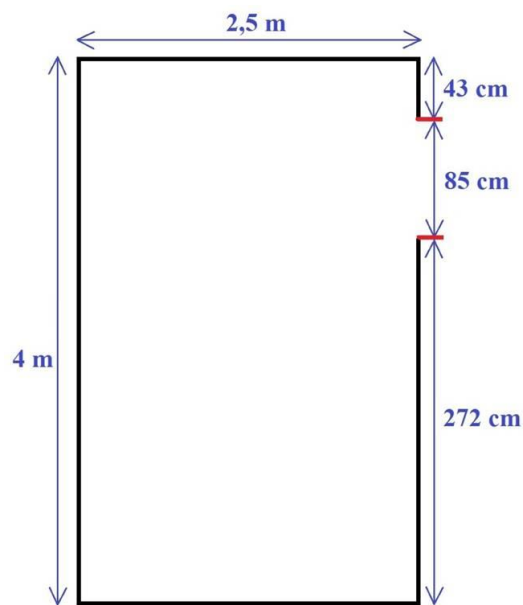
Utilisation de la solution analytique

$$\frac{dN_i}{dt} = \varphi_i^{\text{arrivant}} - \varphi_i^{\text{sortant}}$$

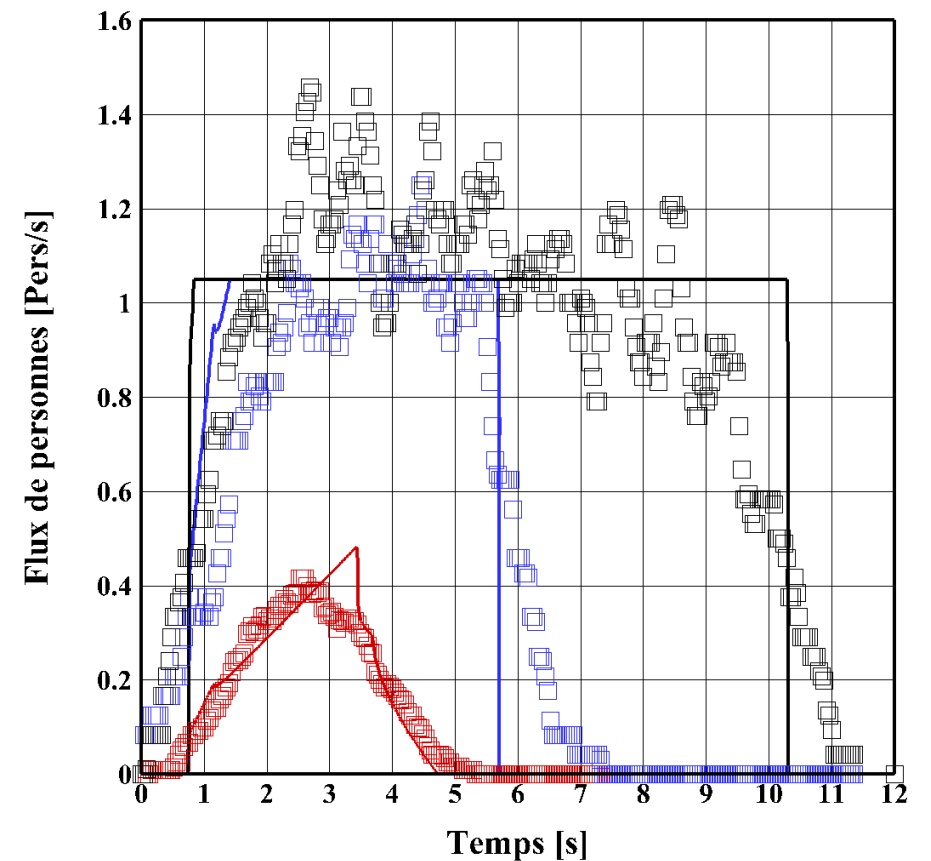
$$\varphi_i^{\text{sortant}} = \begin{cases} \varphi_i^{\text{sortant max}} & \text{si } N_i > 0 \\ \arg \left( \min_{\varphi \in [0; \varphi_i^{\text{sortant max}}]} |\varphi - \varphi_i^{\text{arrivant}}| \right) & \text{si } N_i = 0 \end{cases}$$


Ce modèle estime une fonction de distribution d'évacuation pour le local situé en amont du seuil.

## Utilisation du modèle mésoscopique : cas d'une pièce de 10 m<sup>2</sup>



Répartition des personnes sorties en fonction du temps



Flux de personnes aux seuils de portes

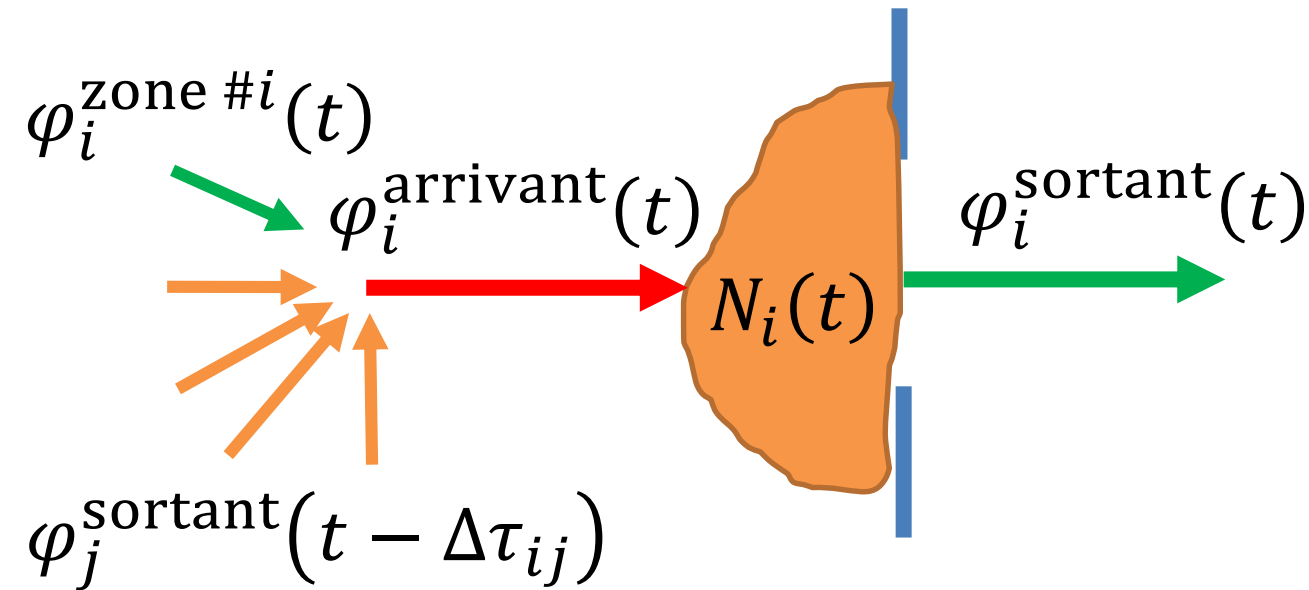
- Réelles possibilités de définir les distributions des personnes évacuées au cours du temps pour des taux d'occupation différents ;
- Extension du modèle aux situations multi-locaux.

## Situation multi-compartiments : AMERIGO

**Hypothèse 1** : représentation des zones à évacuer sous la forme de pièces carrées.

**Hypothèse 2** : flux limite imposé aux seuils

**Hypothèse 3** : vitesse de marche connue entre deux seuils



$$\frac{dN_i(t)}{dt} = \varphi_i^{\text{arrivant}}(t) - \varphi_i^{\text{sortant}}(t)$$

$$\text{et } \varphi_i^{\text{sortant}}(t) = \begin{cases} \varphi_i^{\text{sortant max}} & \text{si } N_i(t) > 0 \\ \arg \left( \min_{\varphi \in [0; \varphi_i^{\text{sortant max}}]} |\varphi(t) - \varphi_i^{\text{arrivant}}(t)| \right) & \text{si } N_i(t) = 0 \end{cases}$$

$$\text{avec } \varphi_i^{\text{arrivant}}(t) = \varphi_i^{\text{zone \#i}}(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{\text{seuil}}} \alpha_{ij} \varphi_j^{\text{sortant}}(t - \Delta\tau_{ij})$$

*Utilisation de la solution analytique*

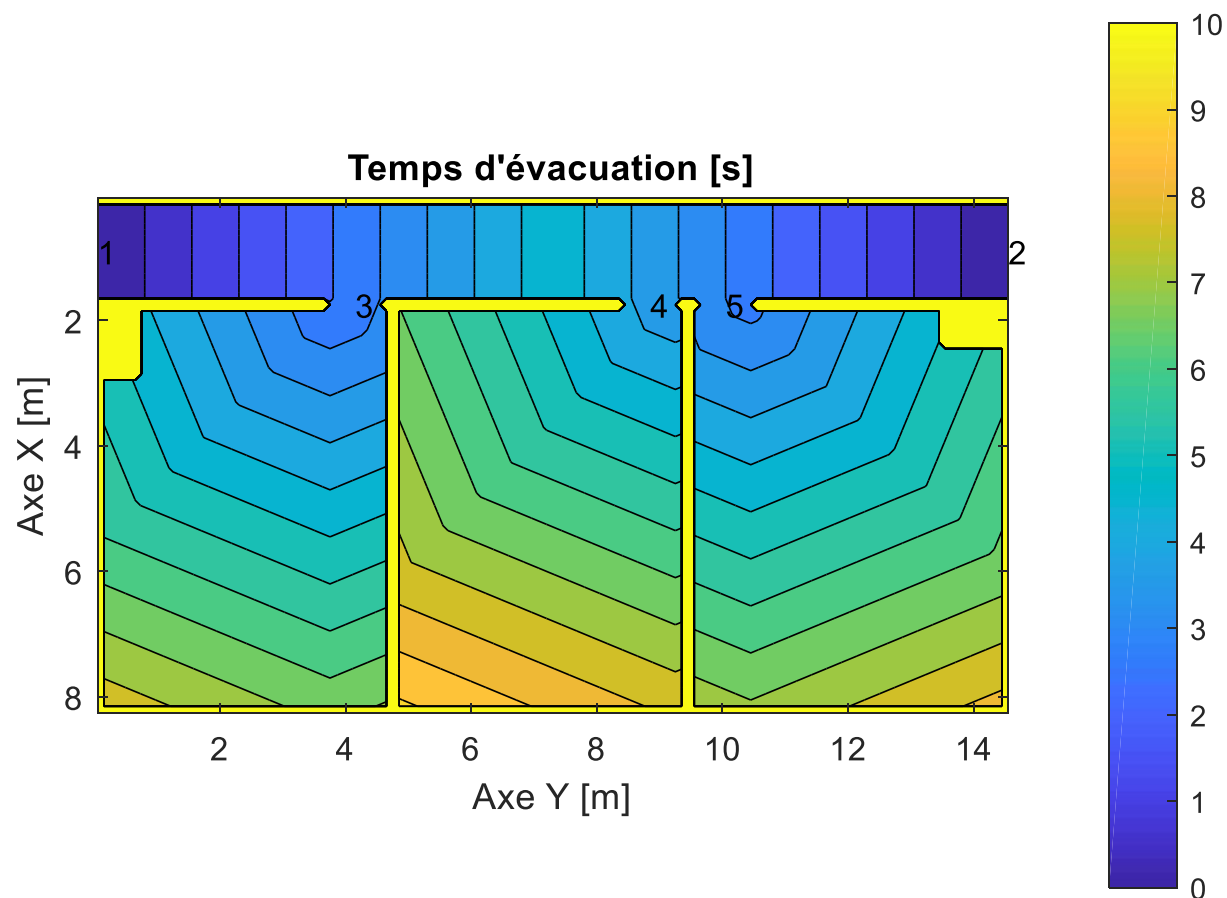
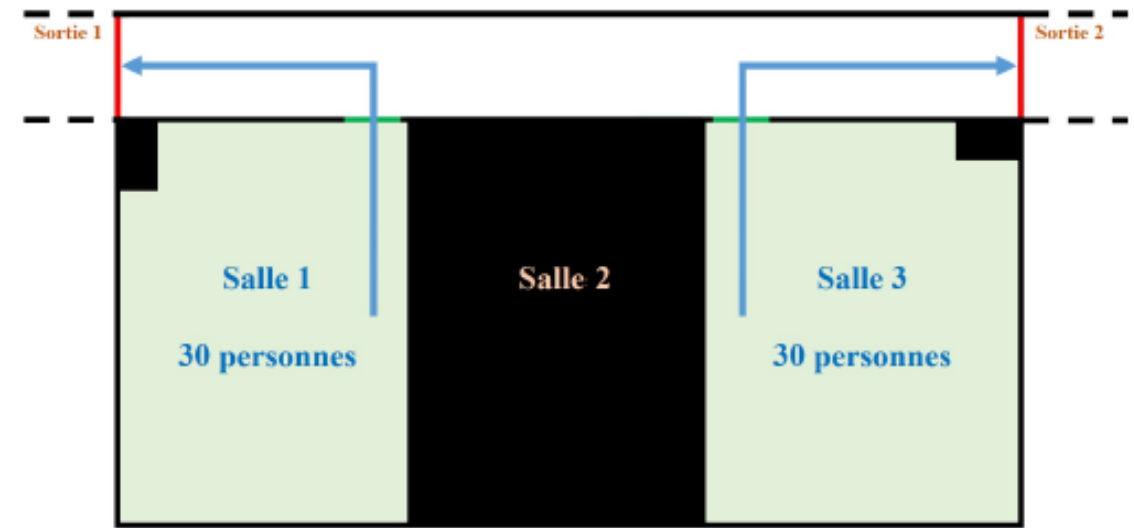
$\alpha_{ij} = 1$  si connexion entre le Seuil #j vers le Seuil #i, sinon 0

*Temps de transit entre le Seuil #j et le Seuil #i*

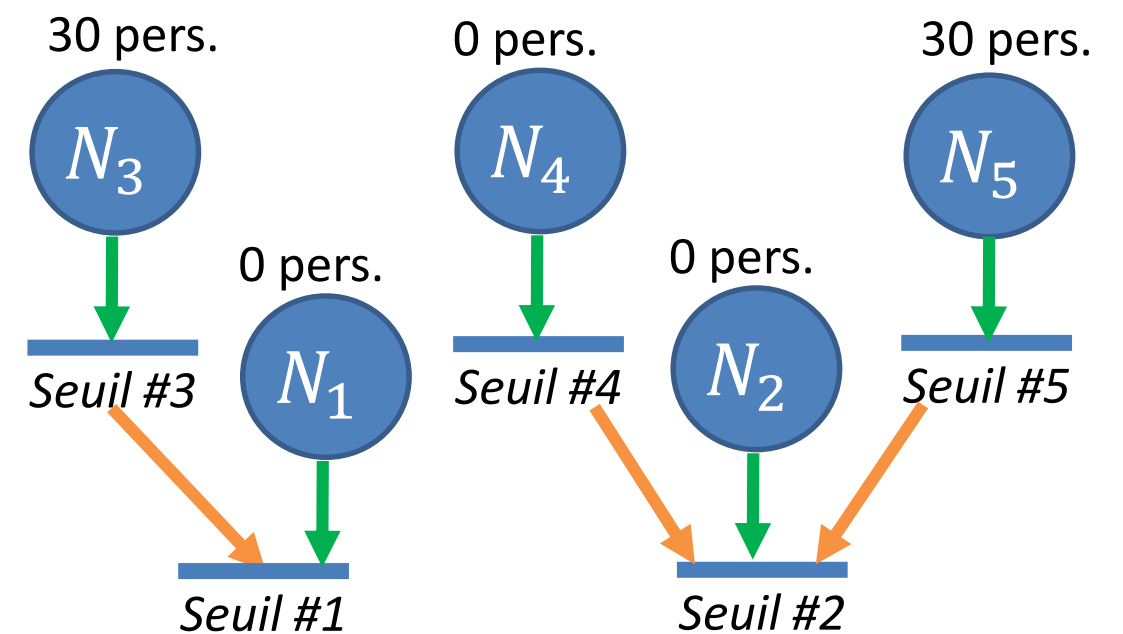


## Cas #1 – EEIGM : évacuation imposée – répétée 3 fois

- Configuration : 3 pièces et un couloir ;
- 60 personnes réparties sur 2 pièces ;
- 2 sorties possibles (Seuil #1 et Seuil #2) ;
- Choix des sorties imposées.



Représentation des lieux selon AMERIGO :



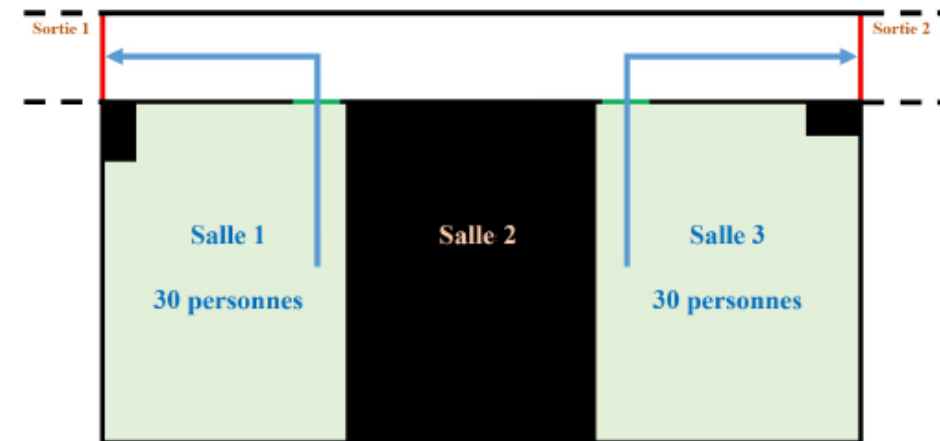
Sans prise en compte de la congestion le temps d'évacuation est de 9,08 s

## Cas #1 – EEIGM : évacuation imposée – répétée 3 fois

- Densité de flux maximal au seuil :

$$\varphi_i^{\text{sortant max}} = 1,16 \text{ Pers/s/m ;}$$

- Vitesse de marche libre :  $V_0 = 1,5 \text{ m/s ;}$



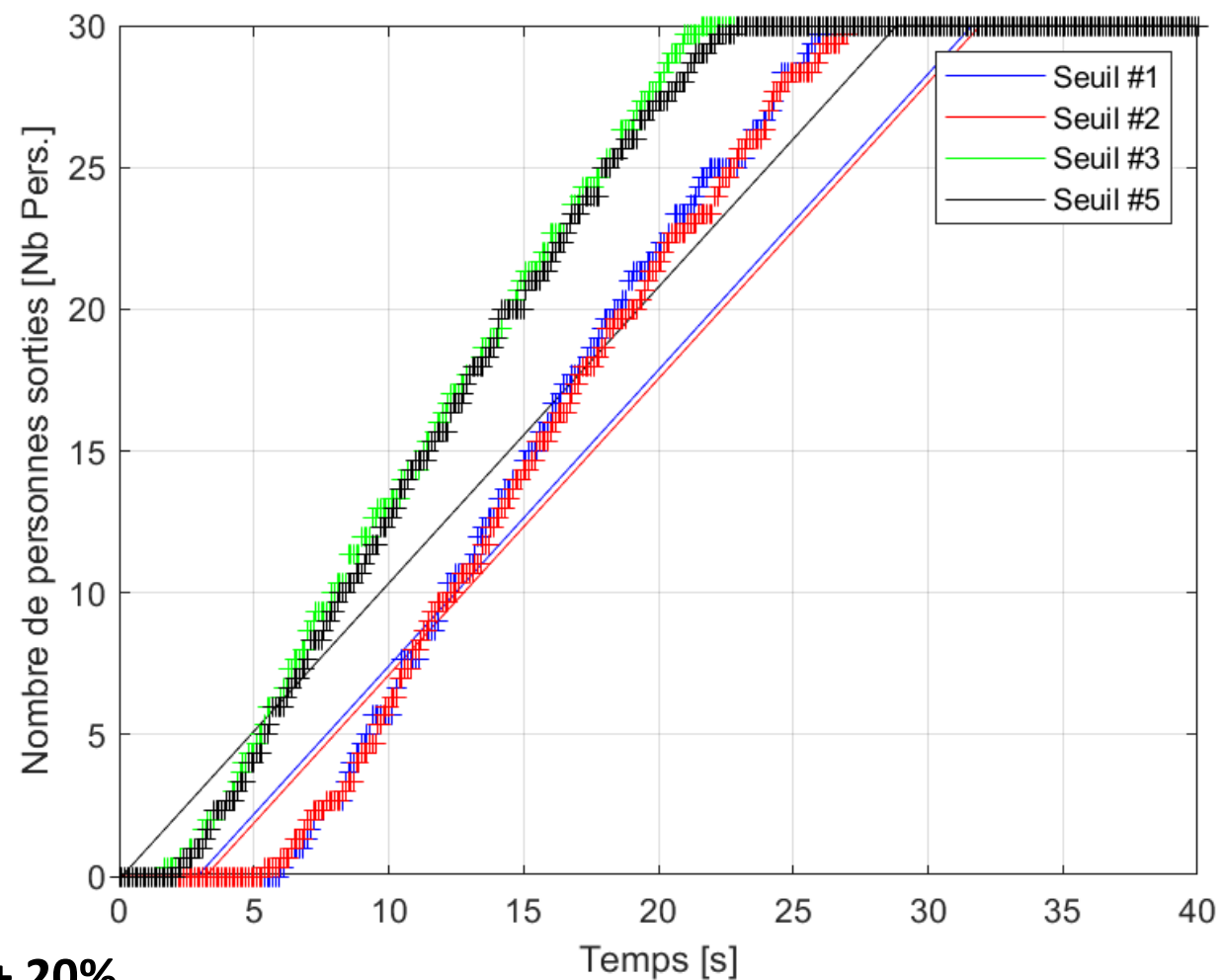
### Temps d'évacuation

Seuil #i	Expé. $t_{\text{évac}} \text{ [s]}$	Simul. $t_{\text{évac}} \text{ [s]}$
1	26,6	31,7
2	27,1	32,0
3	21,6	28,9
4	-	-
5	22,9	28,9



Ecart : + 20%

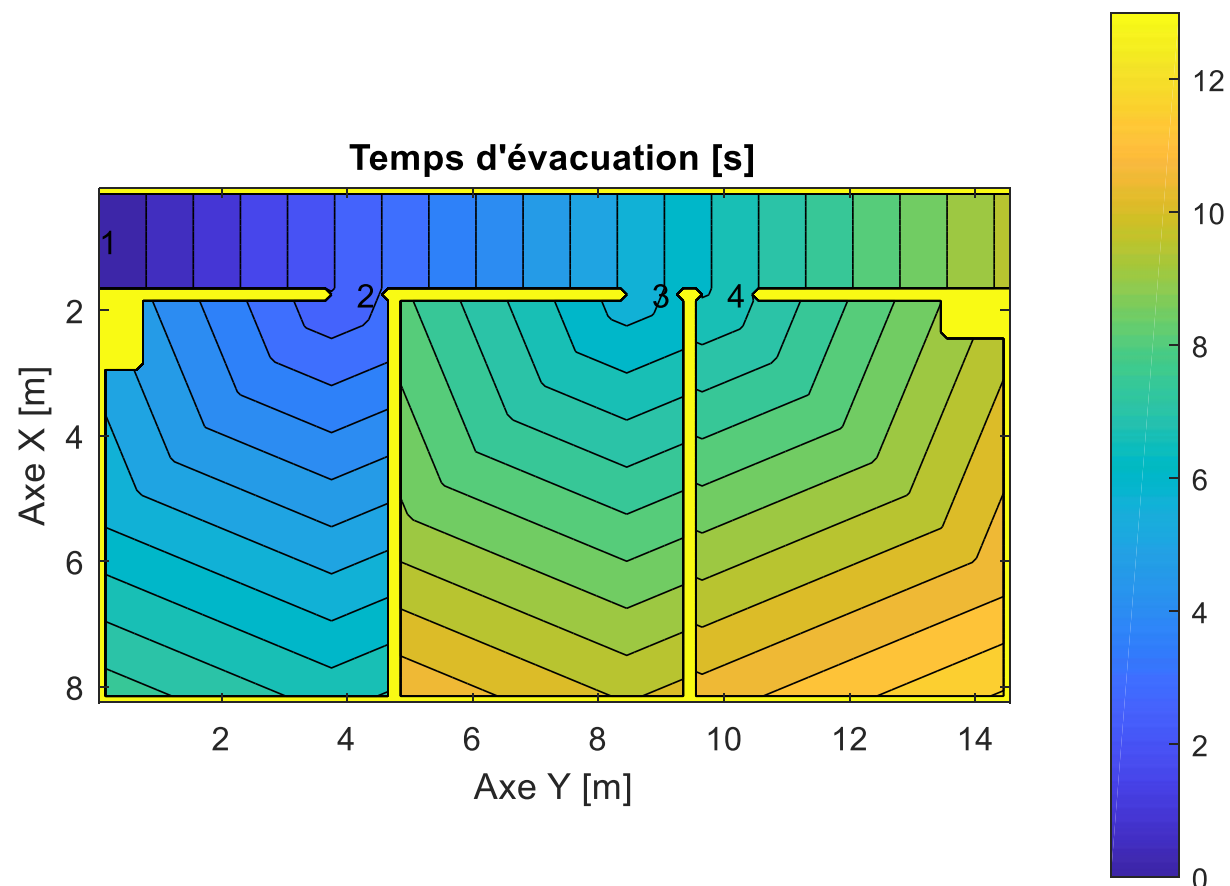
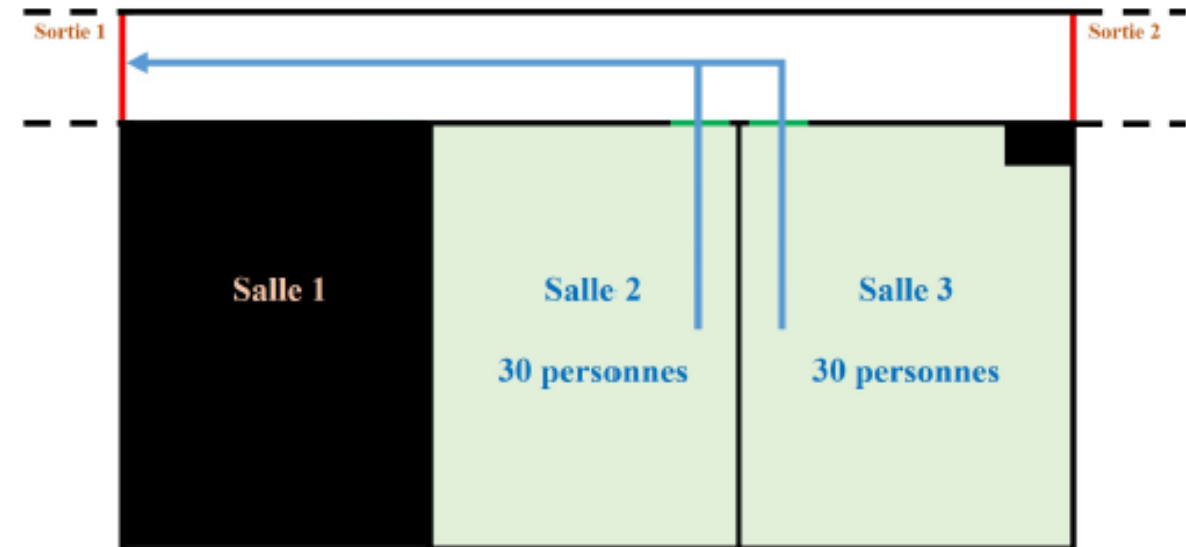
### Distribution des personnes évacuées



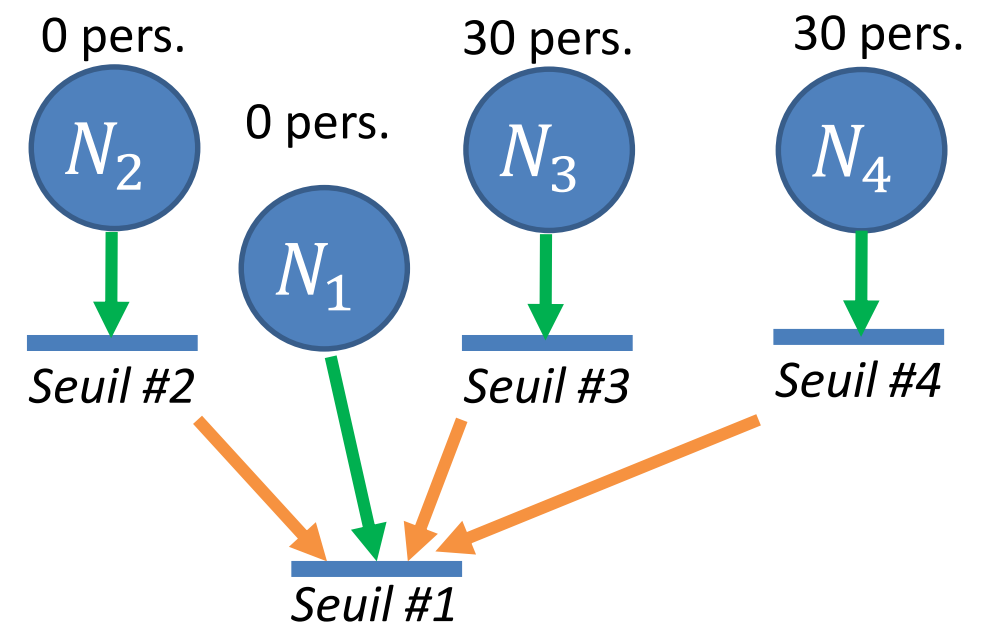
Valeur de la densité de flux maximal au seuil sous-évaluée ?

## Cas #2 – EEIGM : évacuation imposée – répétée 2 fois

- Configuration : 3 pièces et un couloir ;
- 60 personnes réparties sur 2 pièces ;
- 1 sorties possible (Seuil #1) ;
- Choix des sorties imposées.



### Représentation des lieux selon AMERIGO :



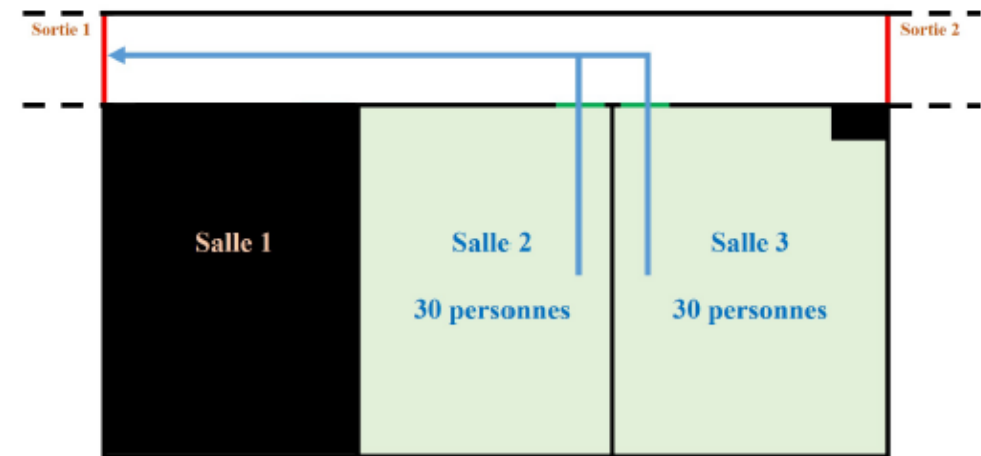
Sans prise en compte de la congestion le temps d'évacuation est de 12,05 s

## Cas #2 – EEIGM : évacuation imposée – répétée 2 fois

- Densité de flux maximal au seuil :

$$\varphi_i^{\text{sortant max}} = 1,16 \text{ Pers/s/m ;}$$

- Vitesse de marche libre :  $V_0 = 1,5 \text{ m/s ;}$



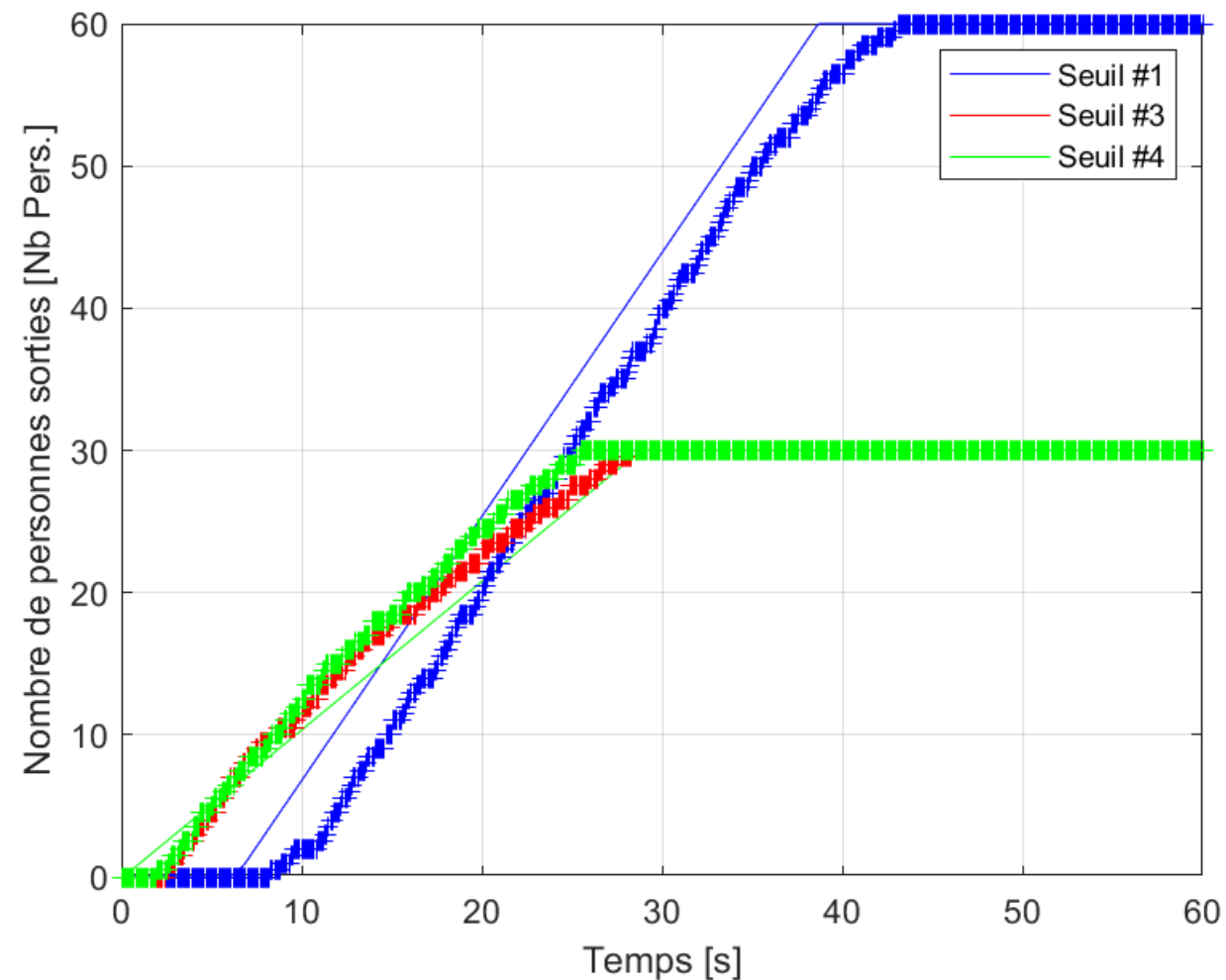
### Temps d'évacuation

Seuil #i	Expé. $t_{\text{évac}} \text{ [s]}$	Simul. $t_{\text{évac}} \text{ [s]}$
1	43,1	38,7
2	-	-
3	28,4	28,9
4	25,5	28,9

Ecart : - 10%



### Distribution des personnes évacuées



Bonne concordance entre les résultats expérimentaux et les prédictions numériques

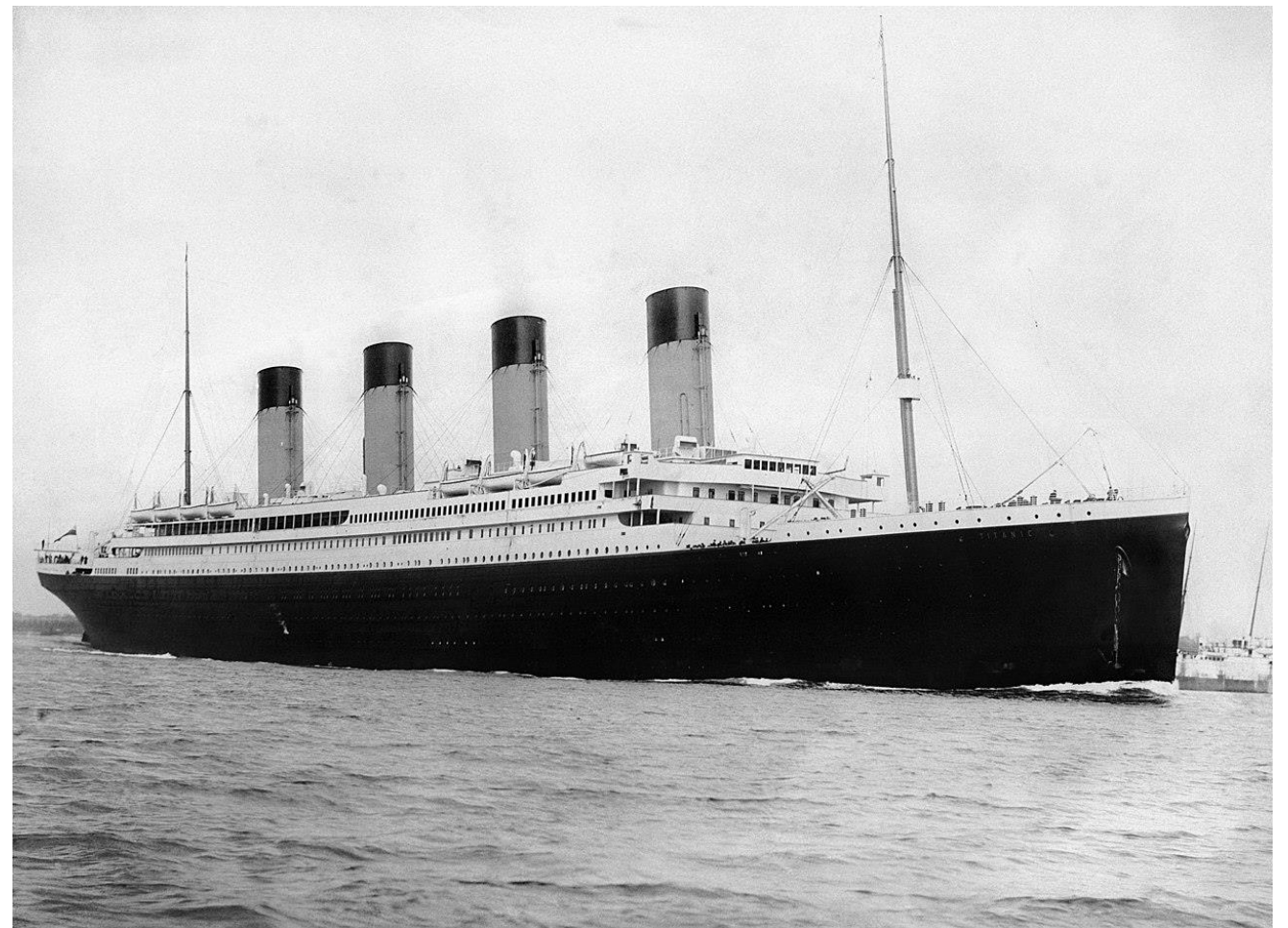
## AMERIGO – Vers le passage au multi-niveaux

Application à un paquebot transatlantique : RMS *Titanic* – 10 au 15 avril 1912

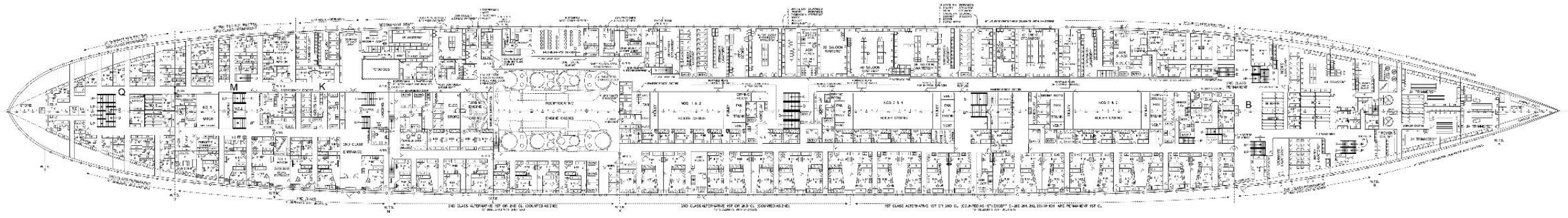
- Dimensions : 269 m x 28 m ;
- 9 ponts passagers ;
- 2471 passagers ;
- 885 membres d'équipage ;

Cas d'étude : Pont E

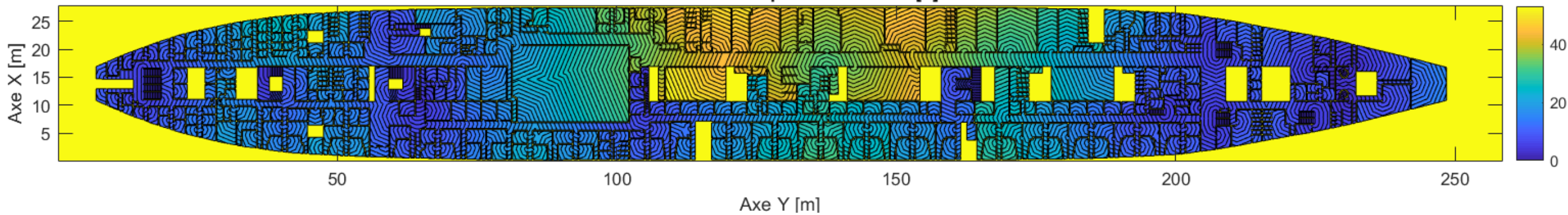
- 1126 personnes ;
- Surface totale libre à l'évacuation de 5 060 m<sup>2</sup>.



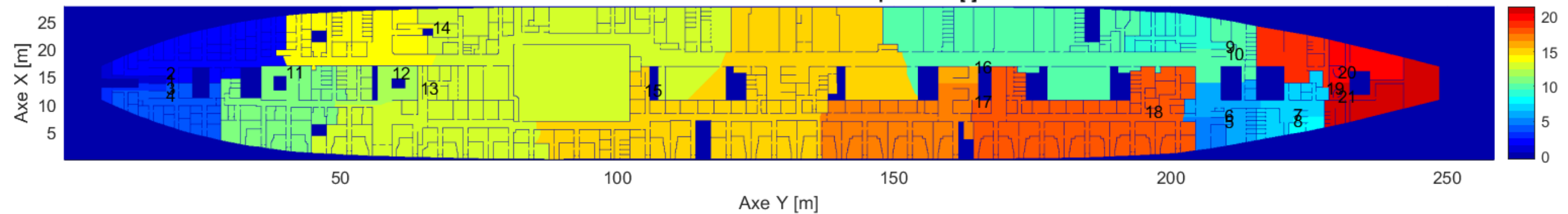
## AMERIGO – Vers le passage au multi-niveaux



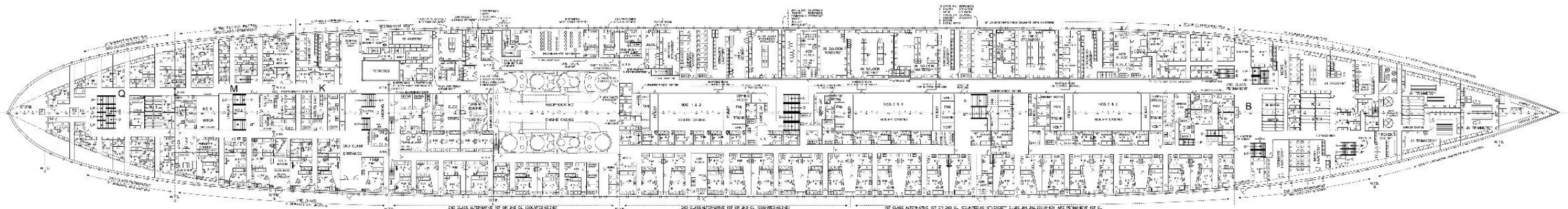
Niveau # 1 - Temps d'évacuation [s]



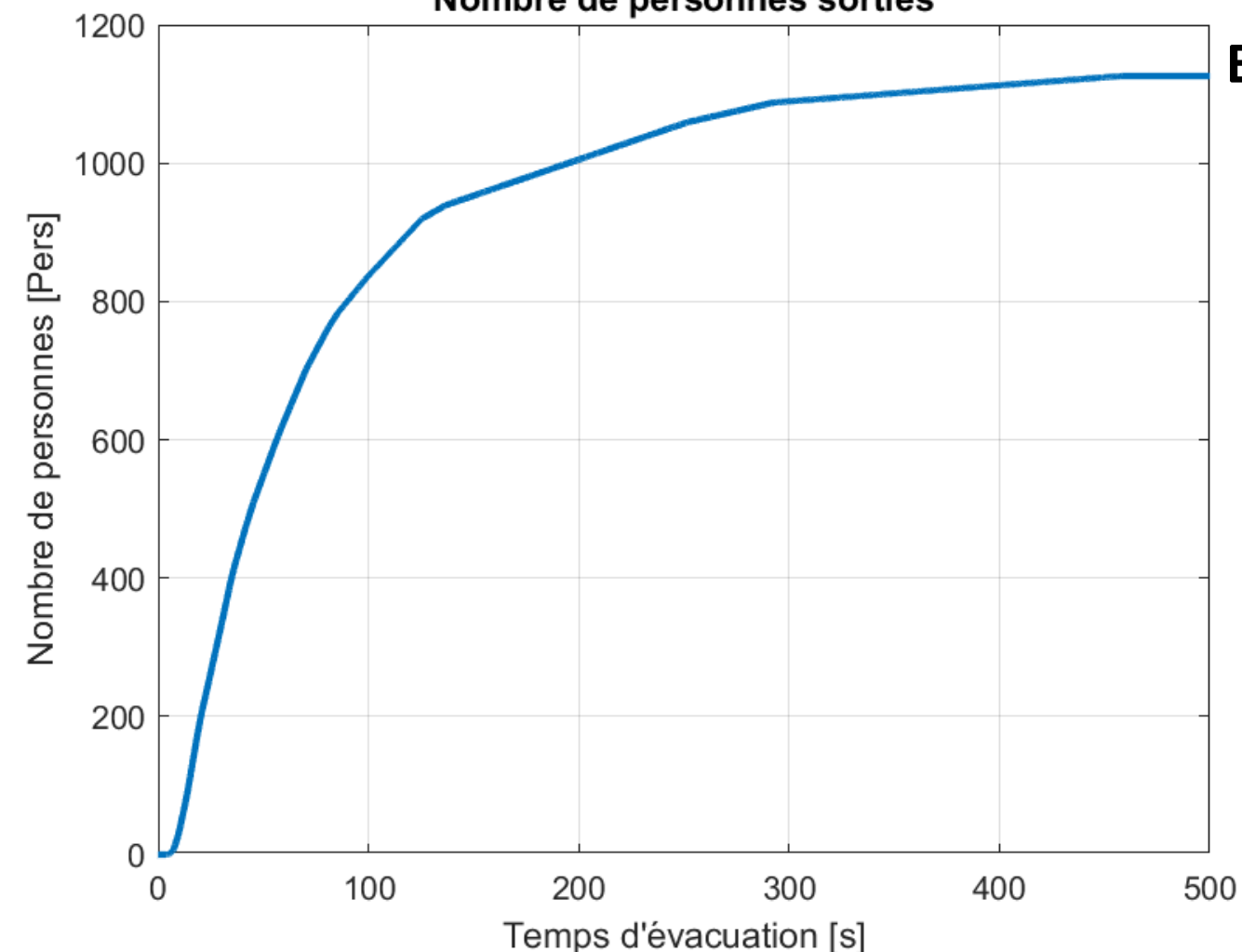
Niveau # 1 - Numéros de sorties optimales [-]



## AMERIGO – Vers le passage au multi-niveaux



Nombre de personnes sorties



### Evacuation de 1126 personnes :

5 s de temps de calcul pour 500 s d'évacuation avec un  $\Delta t$  de 0,1 s

- Sans congestion, le temps maximal de sortie est de **52 secondes** ;
- En prenant en compte la congestion, le temps maximal de sortie est de **495 secondes** (soit 8 minutes et 15 secondes) ...  
... les occupants devant encore progresser sur 6 niveaux pour rejoindre les chaloupes d'évacuation.

## Conclusions de cette première étude

- ❖ Développement d'un modèle d'évacuation par gestion de la congestion à l'échelle mésoscopique
  - ✓ *Expression de la solution de l'évacuation d'une seule personne sur une simple pièce ;*
  - ✓ *Validation du modèle AMERIGO sur une configuration d'une pièce ;*
  - ✓ *Extension aux configurations multi-compartimentées ;*
  - ✓ *Validation à partir de données expé. sur l'évacuation de 60 personnes en pièces / couloir ;*

## Perspectives à courts termes

- ❖ Passage au multi-niveaux du modèle AMERIGO ;
- ❖ Prendre en compte les contraintes liées à l'incendie (par la pénalisation de la vitesse de marche).





## Modèle AMERIGO

### Alternative Model for Evacuation Related to an Idealized conGestion Operation

*Gestion de l'évacuation des personnes  
par suivi de la congestion aux seuils de porte*

*Applications aux ensembles multi-compartimentés*

