ÉVACUATION

Anthony COLLIN
anthony.collin@univ-lorraine.fr

LEMTA/Polytech Nancy - Université de Lorraine

ESIA 2022, La Londe les Maures, 03 juin 2022

Définition de l'évacuation

L'évacuation selon la norme européenne EN ISO 13943 :

*"L'exécution d'une action **efficace** pour atteindre un **refuge sûr** ou une **zone de sécurité**."*

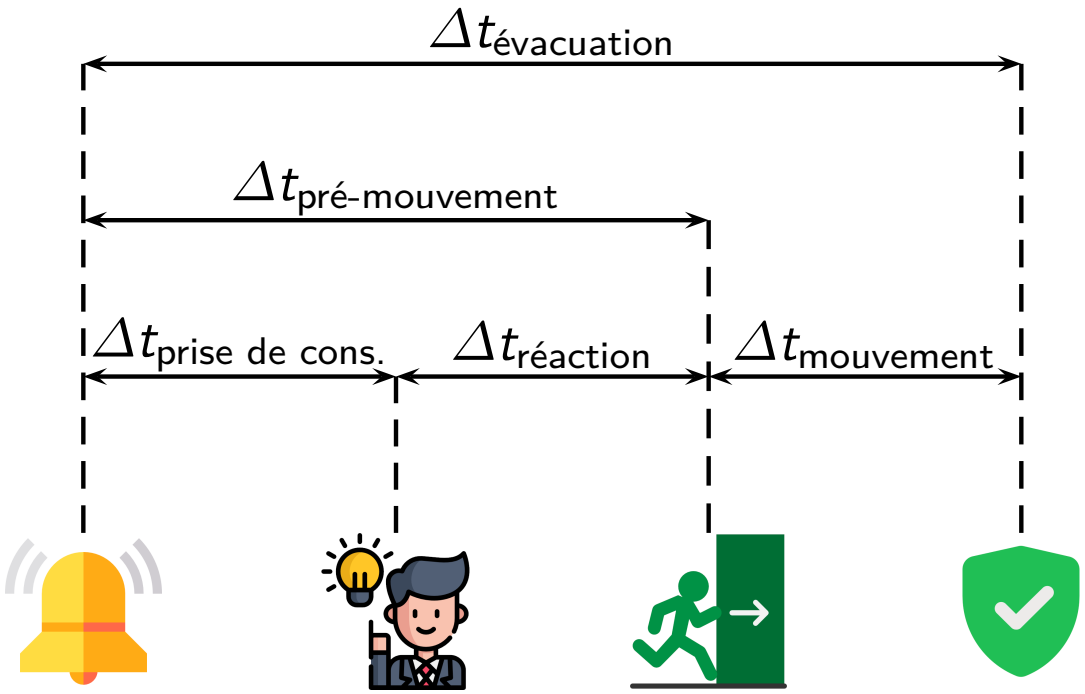
*En situation d'incendie, l'efficacité de cette action est généralement quantifiée par un **temps d'évacuation**, qui correspond à l'intervalle de temps qui s'écoule entre le déclenchement de l'alarme incendie émise vers les occupants et l'instant où les occupants d'une partie spécifique d'un immeuble ou de tout l'immeuble sont capables de pénétrer dans une **zone de sécurité**"*

Un ***refuge sûr*** est un "emplacement temporaire qui est à l'abri d'un danger immédiat dû aux effets de l'incendie" ;

Une ***zone de sécurité*** est une "zone sans danger et depuis laquelle il est possible de se déplacer librement sans être exposé à un incendie".

Définition de l'évacuation

Le temps d'évacuation ($\Delta t_{\text{évacuation}}$) :

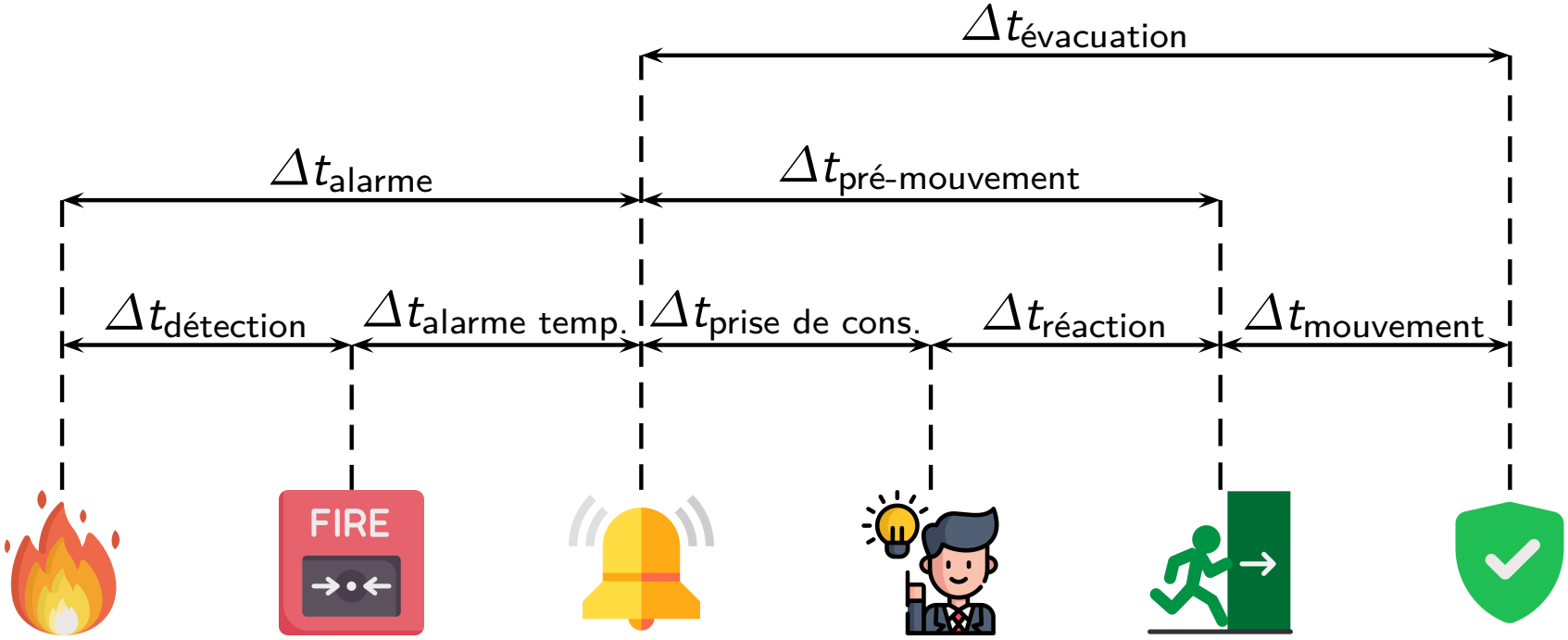


$\Delta t_{\text{pré-mouvement}}$: le temps de pré mouvement nécessaire pour prendre conscience de l'urgence ($\Delta t_{\text{prise de cons.}}$) et pour effectuer une série d'activités avant la phase de cheminement d'évacuation ($\Delta t_{\text{réaction}}$) ;

$\Delta t_{\text{mouvement}}$: le temps de déplacement, c'est à dire le temps nécessaire pour que les occupants se rendent dans un endroit sécurisé.

Définition de l'évacuation

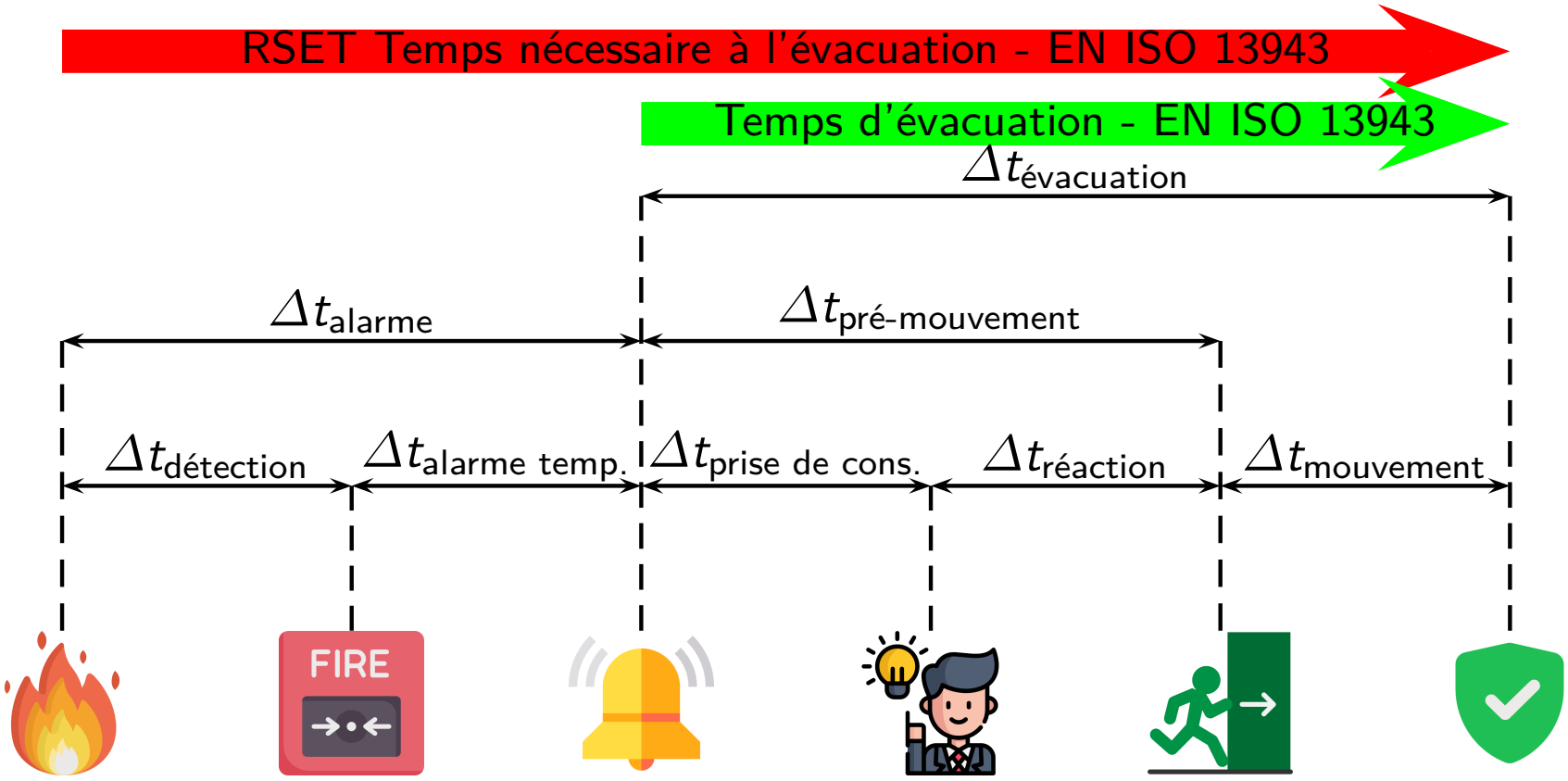
Le temps d'évacuation ($\Delta t_{\text{évacuation}}$) :



$\Delta t_{\text{détection}}$: le temps écoulé entre l'initiation et la détection du feu ;

$\Delta t_{\text{alarme temp.}}$: le temps écoulé entre la détection du feu et la consigne d'évacuation générale donnée aux occupants.

Enjeux de l'évacuation



Le temps d'évacuation des occupants d'un même bâtiment varie selon :

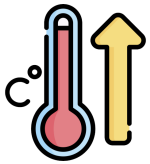
- le comportement des occupants ;
- l'organisation / l'agencement du bâtiment en lui-même.

Enjeux de l'évacuation

Le temps nécessaire à l'évacuation (RSET) doit être inférieur au **temps disponible pour l'évacuation** (ASET) pour laisser le temps nécessaire à l'ensemble des occupants pour évacuer les lieux en toute sécurité.

L'évacuation des occupants peut être altérée par plusieurs facteurs :

- contraintes thermiques (température et/ou flux thermique) ;
- contraintes toxiques (présence de fumées) ;
- contraintes mécaniques (effondrements).



Enjeux de l'évacuation

Les enjeux pour les bâtiments :

- les habitations individuelles ;
- les habitations collectives / locaux à sommeil , les établissements recevant du public (ERP), ... les navires de transport (ro-ro ou ro-pax).

Les enjeux sont essentiellement concentrés sur les bâtiments où,

- les occupants ne connaissent pas forcément les lieux ;
- les distances à parcourir sont importantes ;
- les effets de groupe peuvent avoir un impact significatif sur l'évacuation.

Exemple d'une évacuation

World Trade Center - 11/09/01

Environ 18 000 personnes présentes dans les 2 tours : 1/2 de la capacité nominale pour des raisons d'élections municipales ;

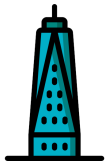
08h46 : impact du premier avion sur la tour Nord au 91ème étage ;

09h02 : la seconde tour (Sud) est touchée au 78ème étage ;

09h59 : la tour Sud s'effrondre (57 min) / 10h28 : la tour Nord s'effondre (102 min) ;

16% de ceux qui se sont échappés de la tour Sud ont utilisé les ascenseurs (total 3 000 vies sauvées) ;

Environ 99% des personnes situées aux étages inférieurs aux impacts ont réussi à évacuer.

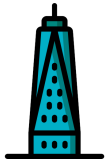


Exemple d'une évacuation

Retour d'expérience sur le déroulé de l'évacuation

Les escaliers de secours dans l'IGH (Immeuble de Grande Hauteur) doivent désormais mesurer au moins 137 cm de large et comporter des marques phosphorescentes sur les marches d'escalier qui soient visibles même en cas de panne de courant ;

Le Code international du bâtiment exige désormais un nouveau système d'ascenseur "sans danger pour les occupants" ou un escalier supplémentaire dans les bâtiments de plus de 128 mètres de haut.



Réglementation

Code de la construction et de l'habitation

Article R.143-4 - *Les bâtiments et les locaux où sont installés les établissements recevant du public doivent être construits de manière à permettre l'évacuation rapide et en bon ordre de la totalité des occupants ou leur évacuation différée si celle-ci est rendue nécessaire.*

Ils doivent avoir une ou plusieurs façades en bordure de voies ou d'espaces libres permettant l'évacuation du public, l'accès et la mise en service des moyens de secours et de lutte contre l'incendie.

Comment dimensionner les sorties ?

Réglementation

Arrêté du 25/06/1980 sur les ERP

Effectif à évacuer	Nombre de largeur des dégagements
De 1 à 19 personnes	1 dégagement de 1 UP (Unité de Passage)
De 20 à 50 personnes	1 dégagement de 1 UP + 1 dégagement accessoire ou 1 escalier de 1 UP + 1 dégagement accessoire
De 51 à 100 personnes	2 dégagements de 1 UP ou 1 dégagement de 2 UP + 1 dégagement acc.
De 101 à 500 personnes	2 dégagements totalisant $(n+1)$ UP n : effectifs arrondis à la centaine supérieure
au-delà de 500 personnes	1 dégagement par 500 ou fraction de 500 personnes +1 totalisant n UP

L'unité de passage : UP = 0,60 m à partir de 3 UP. En dessous, 1 UP = 0,90 m et 2 UP = 1,40 m.

Réglementation

En France, de manière générale, **l'ingénierie de l'évacuation n'est pas encore reconnue** comme le sont l'ingénierie du désenfumage et l'ingénierie du comportement au feu.

Il n'est pas possible de dimensionner les dégagements d'un établissement par le recours à la simulation numérique ou au calcul.

Avec quelques exceptions dans la réglementation française :

- ERP Type GA (GA23) pour les emplacements à caractère d'exploitation ferroviaire "Le dimensionnement des dégagements est défini [. . .] de telle sorte que l'évacuation du public vers une zone hors sinistre soit réalisée en moins de 10 minutes, sauf cas d'espèce à examiner par la commission de sécurité."

Réglementation

- Grand Établissement à Exploitation Multiple (GEEM) Art.17/Sec.6 "L'évacuation du public est réalisée lorsque les personnes sont parvenues sur le parvis (interne ou externe) ou sur la voie publique dans un délai maximal de dix minutes" ;

Le règlement n'impose ni les hypothèses, ni le mode de calcul. Seuls les vitesses et les débits aux points de congestion sont imposés pour les gares :

"Le calcul du temps de transfert du public vers une zone hors sinistre doit faire l'objet d'une note de calcul. Cette note doit préciser les hypothèses retenues et le mode de calcul".

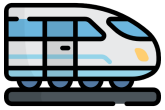
Réglementation

Cas particulier. Transport maritime

L'analyse de l'évacuation des navires (ro-pax) à passagers doit être obligatoirement étudiée selon la circulaire IMO MSC.1/circ. 1238

Cas particulier. Transport ferroviaire

L'analyse de l'évacuation en cas d'incendie n'est pas formellement prescrit pour les véhicules ferroviaires, mais la directive 2008/57/CE propose une analyse des performances du système ferroviaire dans laquelle l'évacuation est incluse.



Le comportement des personnes

Le comportement des personnes fait l'objet de recherches en sciences humaines principalement se basant sur des retours d'expérience de sinistres, des observations et des exercices d'évacuation ;

Ces recherches intègrent l'appréhension de la situation par la personne et les éléments participant à la prise de décision d'évacuer/de ne pas évacuer, d'alerter, d'agir sur le feu ou de suivre un chemin pour évacuer.

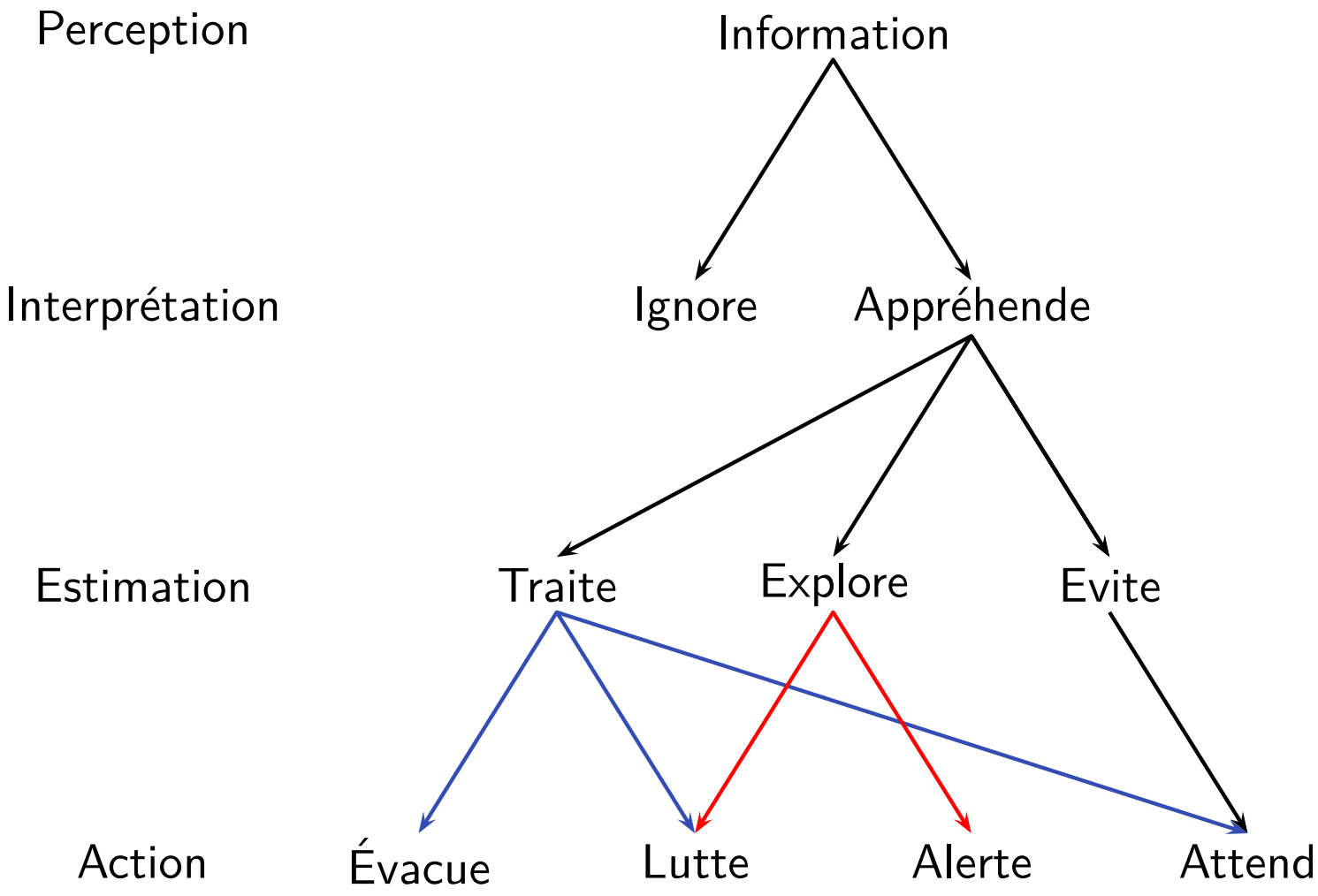
Le comportement des personnes

Chaque action humaine résulte d'un **processus décisionnel** dont les poids dans les décisions sont différents pour chacun.

Les catastrophes passées ont mis en évidence qu'une personne, avant d'agir, **perçoit** des indices, **appréhende** la situation et **estime** le risque à partir de ces indices. Ce n'est qu'ensuite que la personne **prend une décision** sur ce qu'elle doit faire.

D. KULIGOWSKI. The Process of Human Behavior in Fires. NIST Technical Note 1632, NIST, Gaithersburg, Maryland, May 2009.

Le comportement des personnes



D. KULIGOWSKI. The Process of Human Behavior in Fires. NIST Technical Note 1632, NIST, Gaithersburg, Maryland, May 2009.

Le comportement des personnes

Détection du feu et prise de conscience. Recherche d'indices.

Après un premier indice perçu, les personnes recherchent des indices supplémentaires démontrant l'occurrence du feu (fumée, flammes, ou comportement changé d'autres personnes). Les indices peuvent être classés en 3 catégories :

- les signes physiques réels détectés par les sens du corps : les odeurs de fumée, la vue des flammes ou de la fumée, le bruit d'une explosion.
- les indices technologiques associés à l'accident : système d'alarme, incendie (visuelle, sonore, vocal)
- les indices sociaux dans le comportement et la communication des autres personnes, par exemple alerte donnée par une personne, un comportement inhabituel (tension ambiante)

Plus les indices du danger sont clairs, plus la prise de conscience est rapide, ce qui mène à une action.

D. KULIGOWSKI. The Process of Human Behavior in Fires. NIST Technical Note 1632, NIST, Gaithersburg, Maryland, May 2009.

Le comportement des personnes

Le concept d'engagement. Une personne a tendance à continuer ce qu'elle est occupée à faire, et ne détourne pas facilement son attention vers des événements extérieurs à son activité qui l'amèneraient à entreprendre une autre activité.

Le concept de rôle. Les visiteurs et les employés n'ont pas le même comportement en situation d'urgence. Les visiteurs ont généralement un rôle passif, ne réagissent pas fortement à une situation qui est peut être normale ou maîtrisée, et imitent le comportement des personnes voisines.

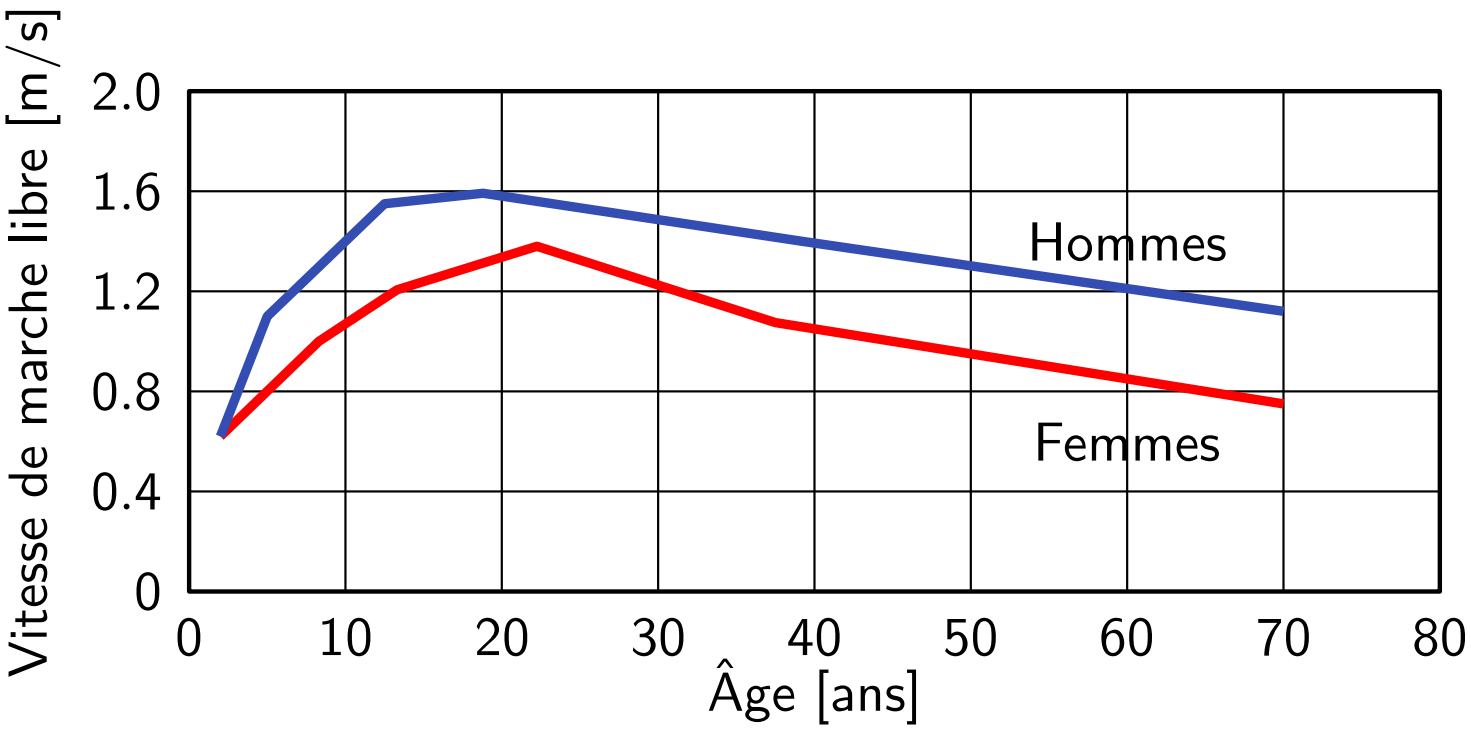
Le comportement des personnes

Le concept d'évitement/de démenti associé au concept d'attention. Un individu tend à ignorer ou à rejeter l'idée qu'un événement inattendu ou désagréable est en cours de réalisation.

Le concept d'affiliation. Il est fondé sur l'existence d'une tendance à se rapprocher des personnes et des lieux familiers.

Le comportement des personnes

La vitesse de marche libre. Exemple de courbes de vitesse de marche, d'après la circulaire IMO MSC.1/circ 1238

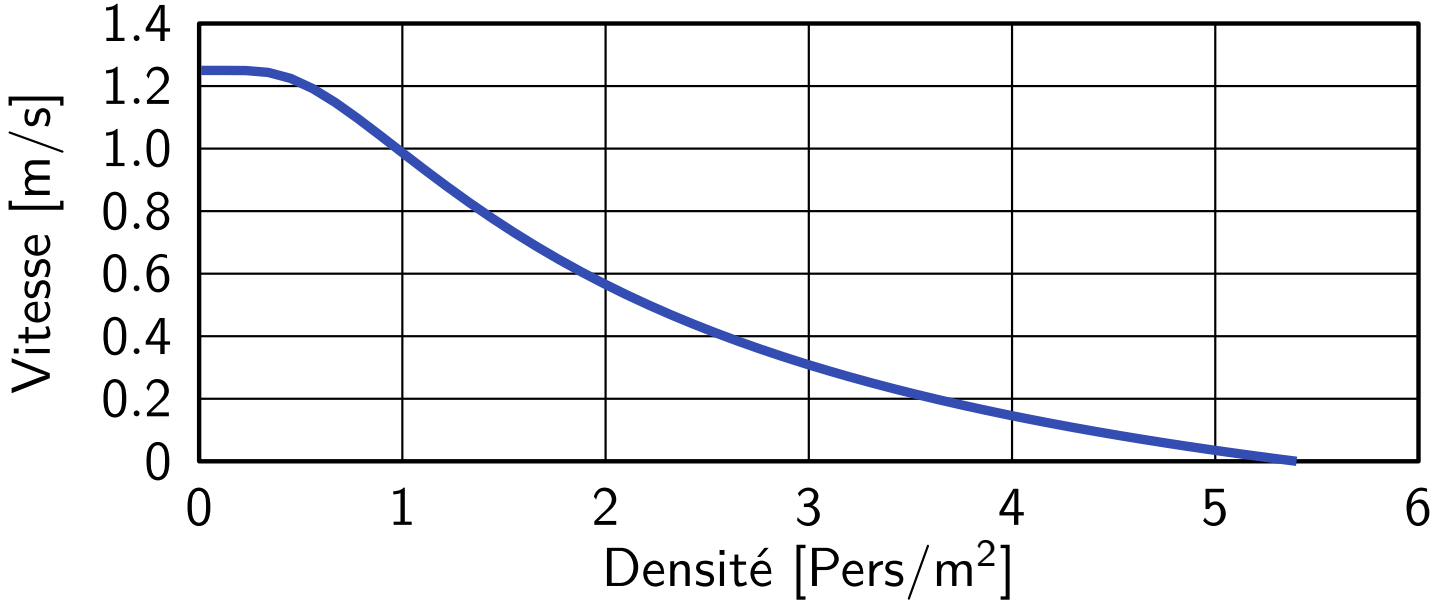


. . . la vitesse de marche dépend aussi de sa destination, de la familiarité du trajet et de sa culture.

Le comportement des personnes

Diagramme Vitesse-Densité. Modèle de Weidmann

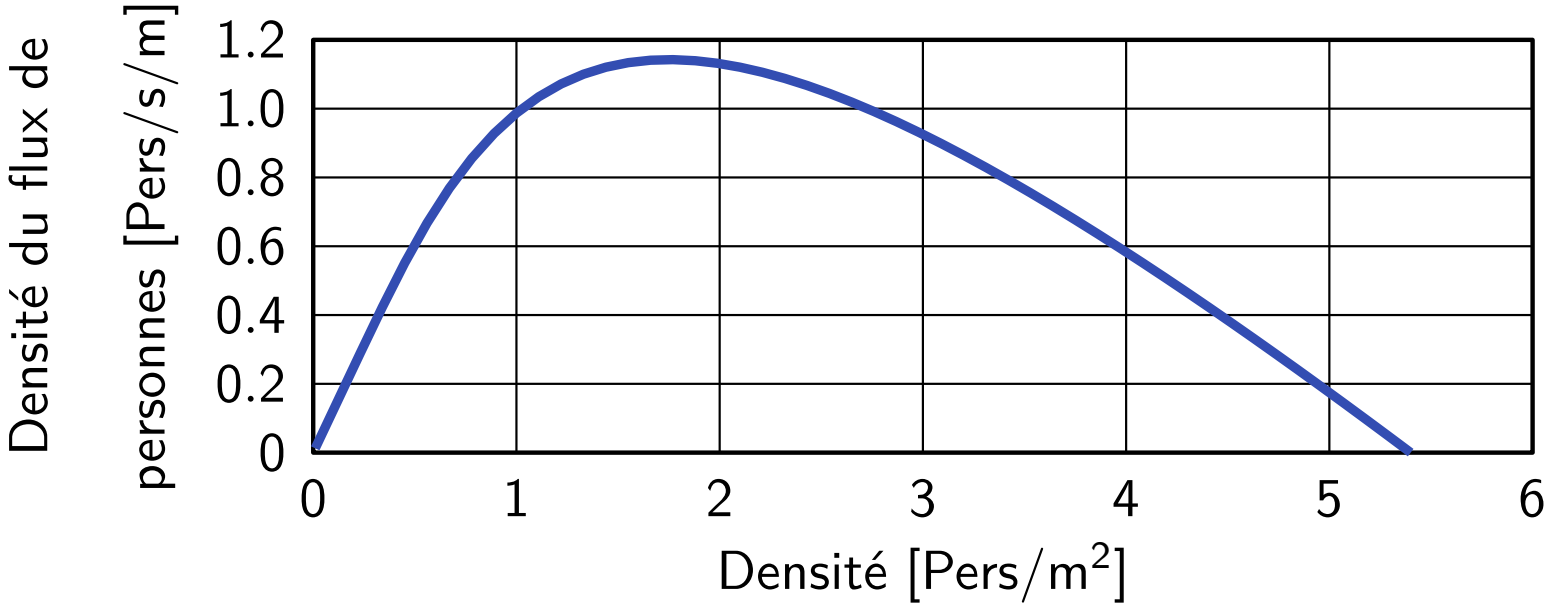
$$V(\rho) = V_0 \left(1 - \exp\left(-1.913\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_c}\right)\right)\right)$$



avec $V_0 = 1.25$ m/s et $\rho_c = 5.4$ pers/m^2.

Le comportement des personnes

Diagramme fondamental du mouvement des personnes $\varphi = \rho V(\rho)$

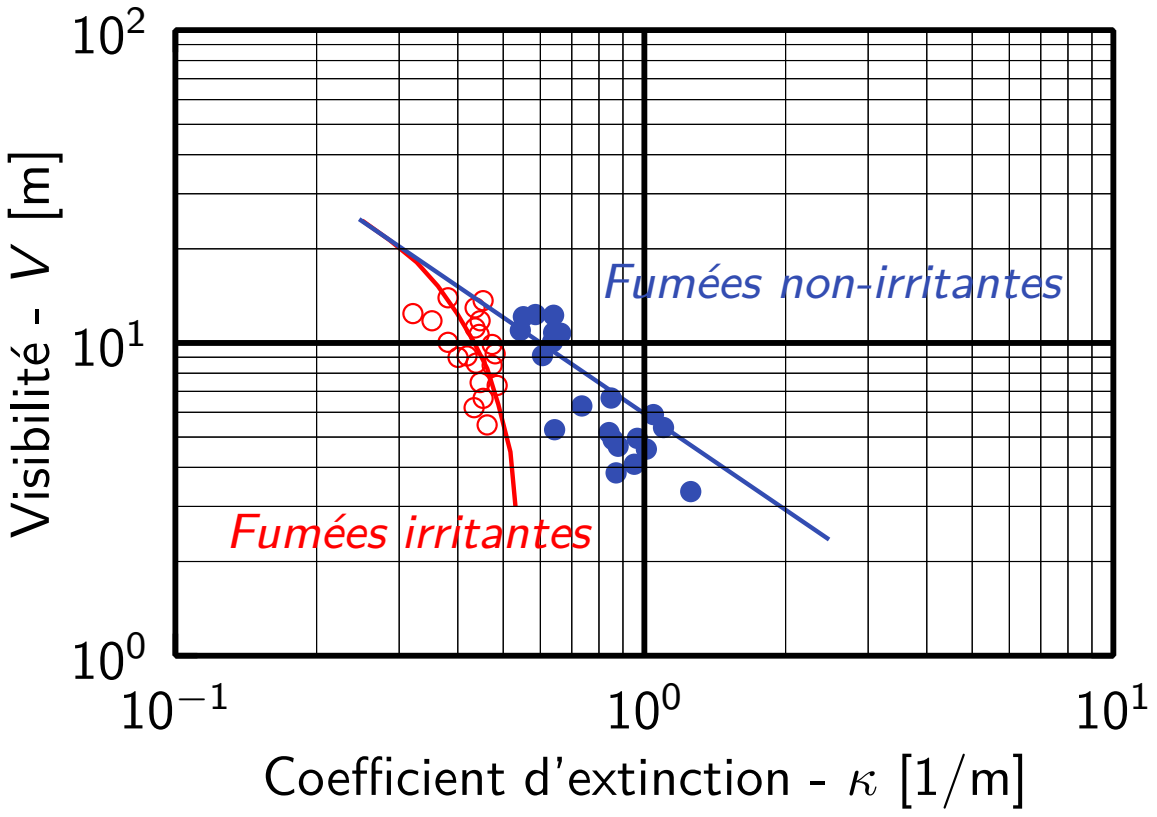


avec $V_0 = 1.25$ m/s et $\rho_c = 5.4$ pers/m^2.

Effets de l'incendie sur les personnes

Effets de la visibilité/opacité

Essais sur des bûchers bois avec des panneaux de signalisation.



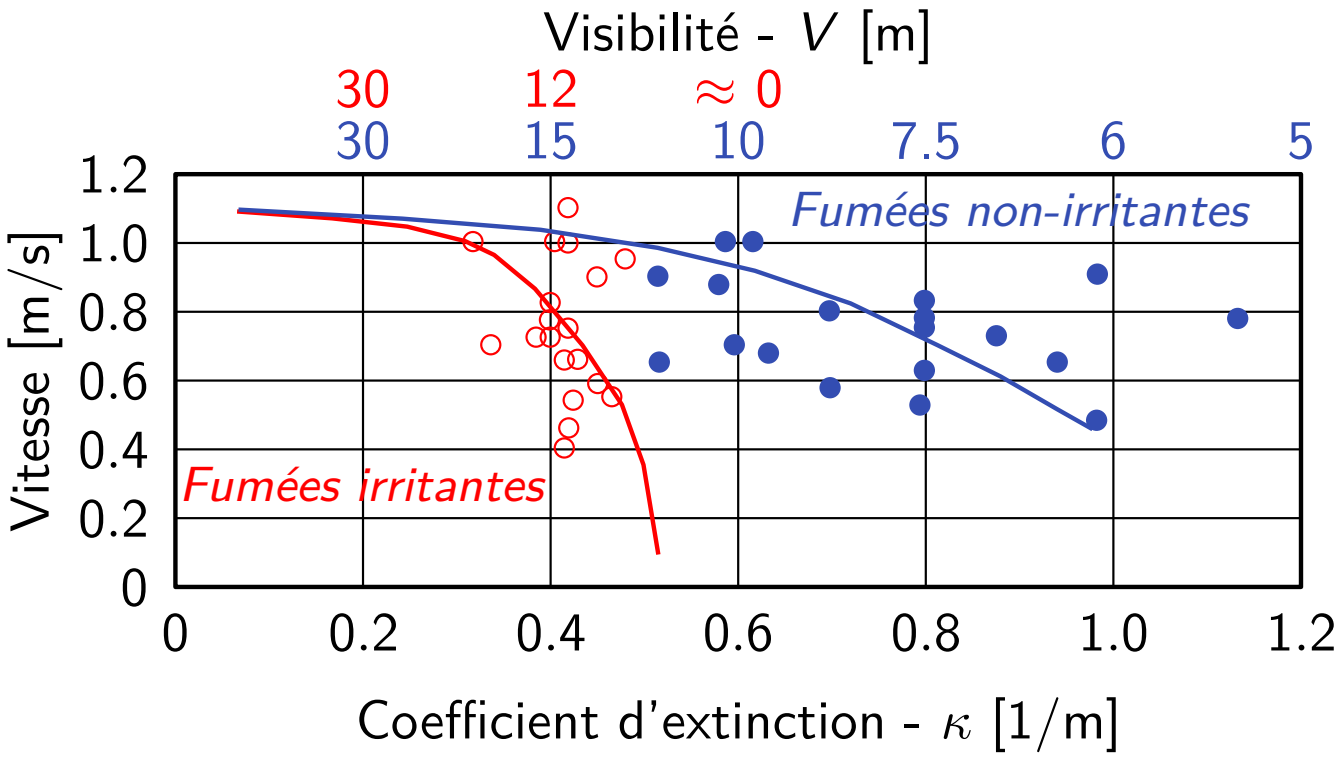
Loi de Jin : $V\kappa = 6$

T. Jin, Studies on human behavior and tenability. In Fire Safety Science, Proceedings of the Fifth International Symposium, p. 3-21, 1997.

Effets de l'incendie sur les personnes

Effets de la visibilité/opacité

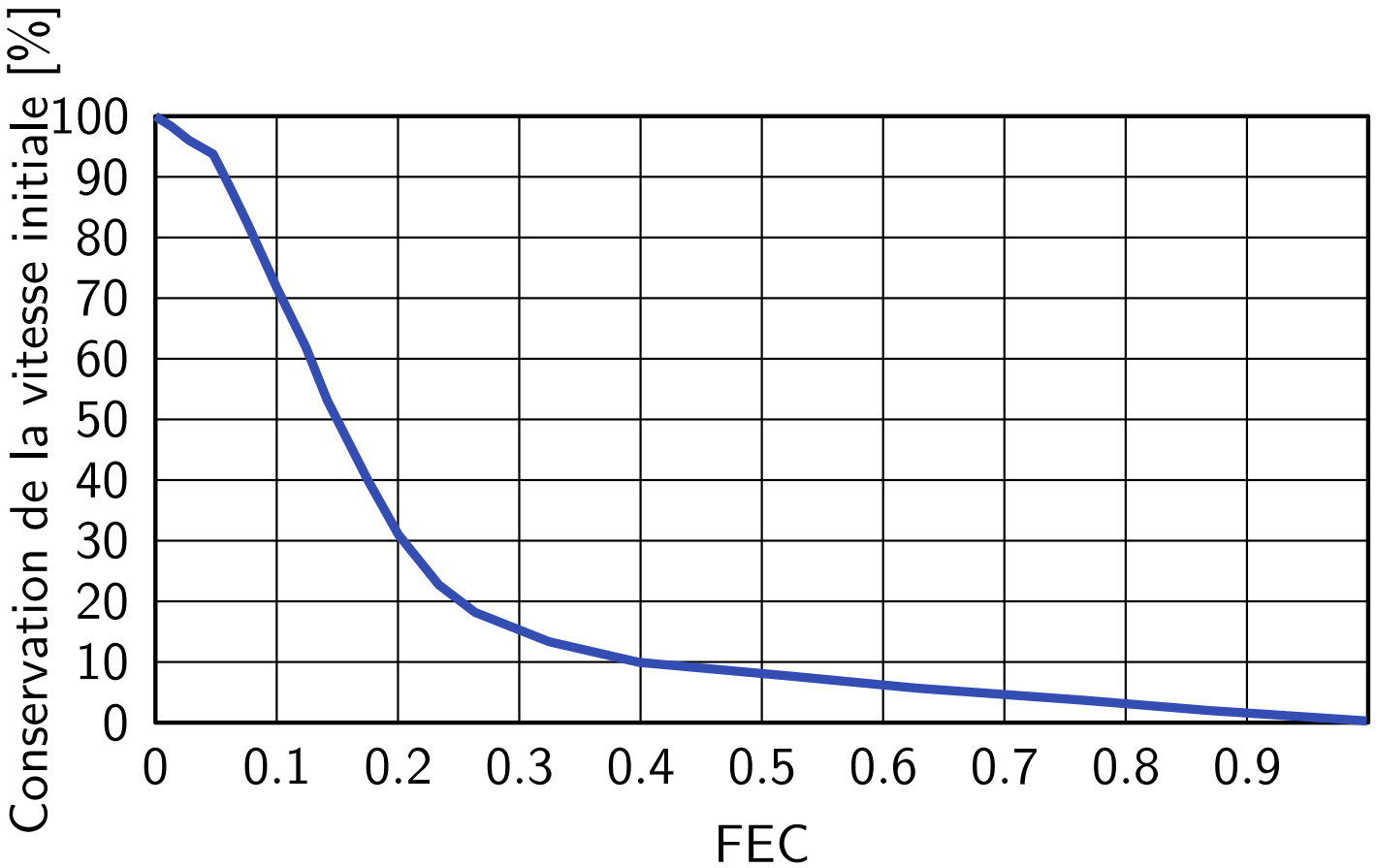
Essais sur des bûchers bois avec des panneaux de signalisation.



T. Jin, Studies on human behavior and tenability. In Fire Safety Science, Proceedings of the Fifth International Symposium, p. 3-21, 1997.

Le comportement des personnes

Effets de la toxicité des fumées



La "FEC" représente la concentration effective fractionnaire des gaz irritants (Cf. Technique de l'Ingénieur, Eric Guillaume).

D.A. Purser and S. Gwynne, Identifying critical evacuation factors and the applications of egress models. Proceedings of 11 th International Conference Interflam 2007, p. 203-214 (2007)

Le comportement des personnes

Contraintes thermiques

Exemples de critères pris sur IMO MSC.1/Circ. 1552

Les critères limites pour évaluer les temps d'évaluation sont,

- Température maximale de l'air : 60°C ;
- Densité de flux maximale rayonnée : 2,5 kW/m^2 ;
- Visibilité minimale : 10 m ou 5 m dans les espaces $\leq$ 100 m^2 ;
- Concentration maximale de CO : 1200 ppm (exposition instantanée), 500 ppm pendant 20 min.

Modèles pour l'évacuation

Modèle microscopique : Échelle 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, ...

Modèle macroscopique : Échelle d'une foule

- Évolution d'une densité de personnes [Pers/m^2] selon une équation bilan de transport ;
- Travaux de Hughes *et col.*, Colombo *et col.*, Bellomo *et col.*, ...

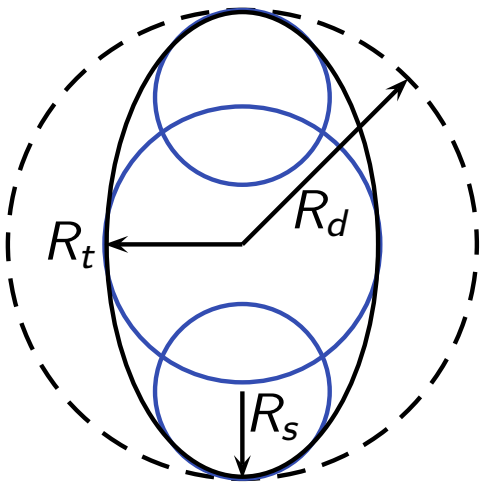
Modèle mésocopique : Échelle d'une pièce

- 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, ...

Modèles pour l'évacuation

Modèle microscopique : Échelle d'un agent

Représentation d'un agent :



Type d'individu	R_d [m]	R_t/R_d	R_s/R_d	Vitesse [m/s]
Adulte	0,255 ± 0,035	0,5882	0,3725	1,25 ± 0,30
Homme	0,270 ± 0,020	0,5926	0,3704	1,35 ± 0,20
Femme	0,240 ± 0,020	0,5833	0,3750	1,15 ± 0,20
Enfant	0,210 ± 0,015	0,5714	0,3333	0,90 ± 0,30
Personne âgée	0,250 ± 0,020	0,6000	0,3600	0,80 ± 0,30

Modèles pour l'évacuation

Modèle microscopique : Échelle d'un agent #i

Équations du mouvement : $$\frac{\mathrm{d}\,\boldsymbol{x}_i\,(t)}{\mathrm{d}\,t} = \boldsymbol{v}_i\,(t)$$

Bilan de force : $$m_i \frac{\mathrm{d}\,\boldsymbol{v}_i\,(t)}{\mathrm{d}\,t} = \boldsymbol{f}_i\,(t) + \boldsymbol{\xi}_i\,(t)$$

avec,

$$\boldsymbol{f}_i = \frac{m_i}{\tau_i}\left(\boldsymbol{v}_i^0 - \boldsymbol{v}_i\right) + \sum_{j\neq i}\left(\boldsymbol{f}_{ij}^{\mathrm{soc}} + \boldsymbol{f}_{ij}^{\mathrm{c}} + \boldsymbol{f}_{ij}^{\mathrm{att}}\right) + \sum_{w}\left(\boldsymbol{f}_{iw}^{\mathrm{soc}} + \boldsymbol{f}_{iw}^{\mathrm{c}}\right) + \sum_{k}\boldsymbol{f}_{ik}^{\mathrm{att}}$$

Bilan sur l'accélération angulaire : $$I_i^z \frac{\mathrm{d}^2\,\varphi_i\,(t)}{\mathrm{d}\,t^2} = M_i^z\,(t) + \eta_i^z\,(t)$$

avec,

$$M_i^z = \frac{I_i^z}{\tau_i^z}\left(\tilde{\omega}_i^0 - \omega_i\right) + \sum_{j\neq i}\left|\left|\boldsymbol{R}_{ij}^{\mathrm{c}} \wedge \boldsymbol{f}_{ij}^{\mathrm{c}} + \boldsymbol{R}_{ij}^{\mathrm{soc}} \wedge \boldsymbol{f}_{ij}^{\mathrm{soc}}\right|\right|$$

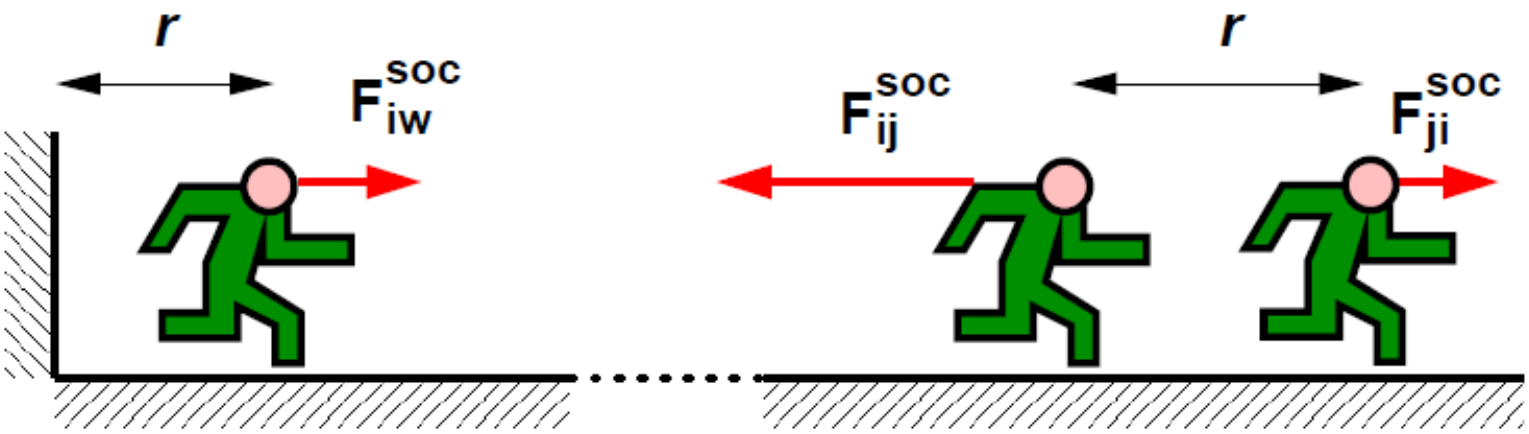
m_i, τ_i, I_i^z et τ_i^z sont également définis pour chaque type d'agent

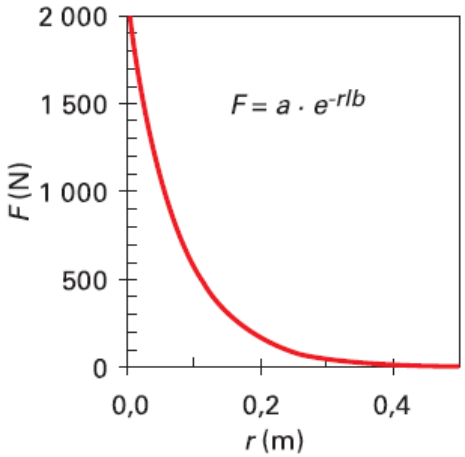
Modèles pour l'évacuation

Modèle microscopique : Échelle d'un agent #i

Modèle de force sociale d'Helbing modifié

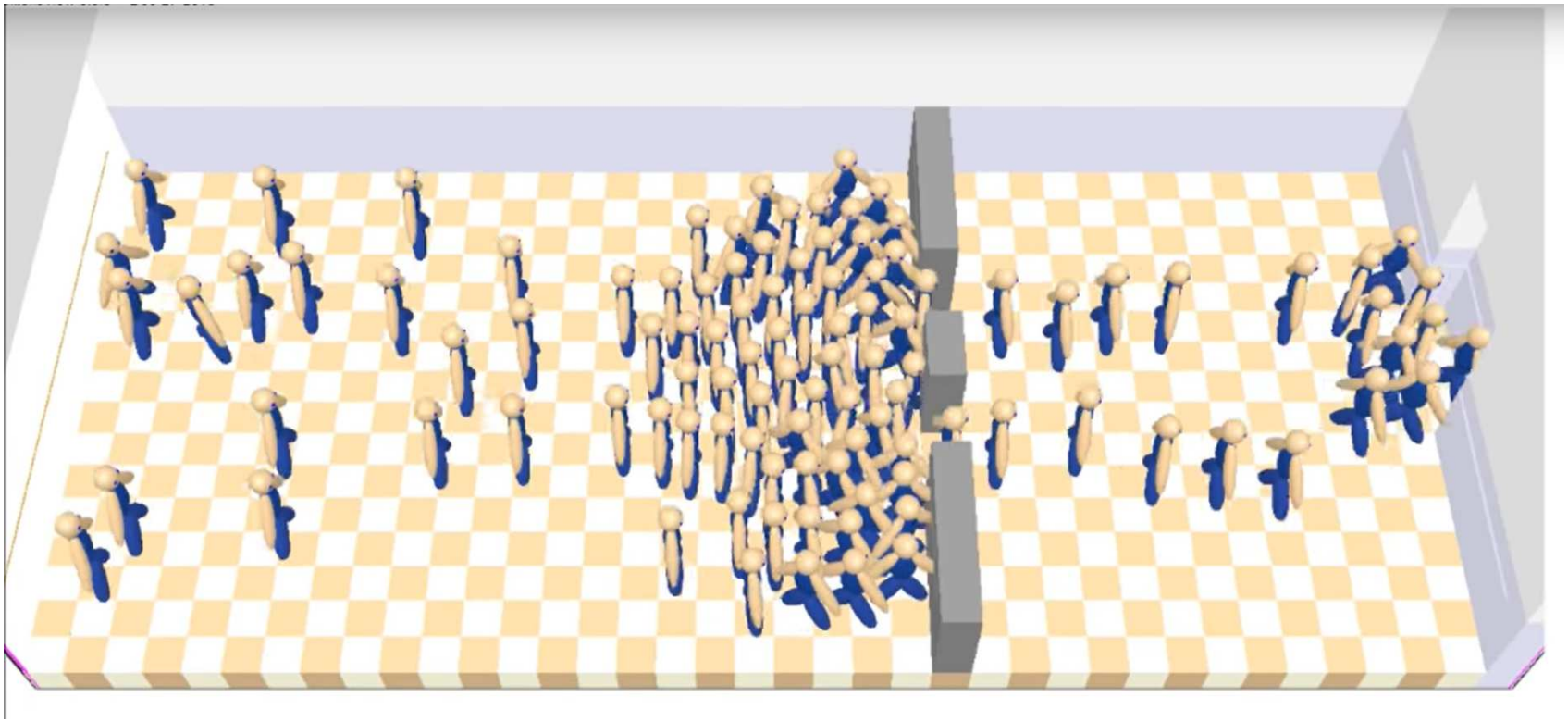
- Les agents évitent de marcher trop près des murs, ainsi que des autres individus ;





Modèles pour l'évacuation

Modèle microscopique : Échelle d'un agent #i



Simulations Ruggiero Lovreglio

Modèles pour l'évacuation

Modèle microscopique : Échelle d'un agent #i

Interactions entre le feu et les agents

- Réduction de la vitesse de marche avec la densité de fumée (Frantzich et Nilsson)

$$v_i^0 = \max\left\{ v_{i,\min}^0, v_i^0 \left(1 + \frac{\beta}{\alpha}\kappa_s\right)\right\}$$

  avec $\alpha =$ 0,7706 m/s et $\beta =$ -0,057 m^2/s.

- Effets toxiques des fumées font appel au modèle de Purser ;
- Algorithme décisionnel sur le choix des sorties (visibles/familières/...).

Modèles pour l'évacuation

Modèle macroscopique : Échelle d'une foule

Hypothèses :

- En l'absence de contrainte, les personnes se déplacent à leur vitesse de marche libre ;
- La vitesse de marche des personnes est fonction de la densité de personnes ρ dans leur voisinage ;
- Les personnes cherchent à minimiser leurs temps de sortie et évitent si besoin les zones encombrées.

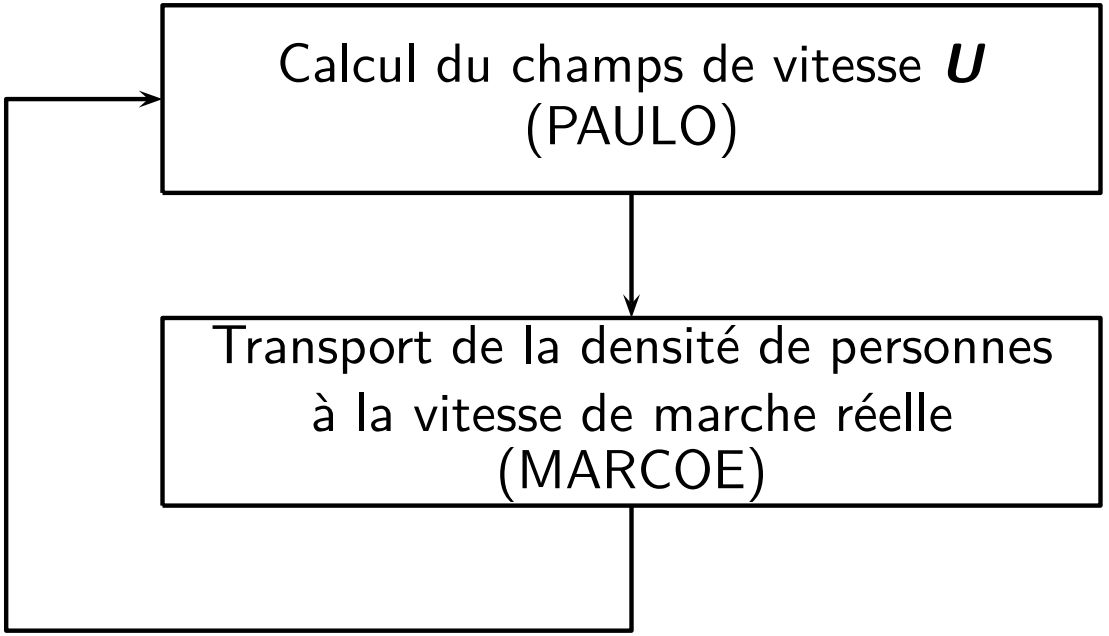
Équation de conservation de la densité de personnes ρ transportée dans un champ de vitesses,

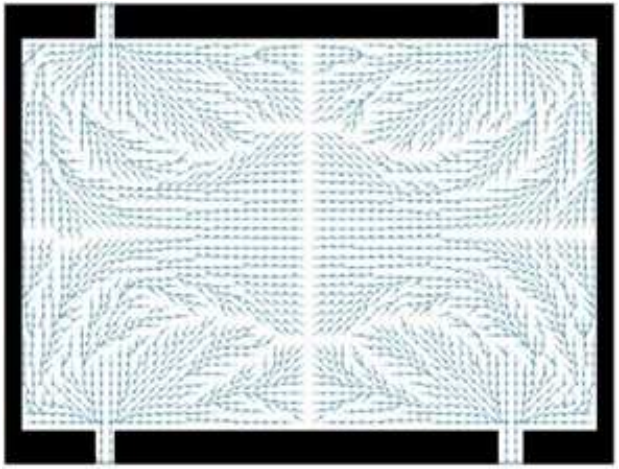
$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \boldsymbol{v}) = 0 \\ \boldsymbol{v} = V(\rho)\,\boldsymbol{U} \end{cases}$$

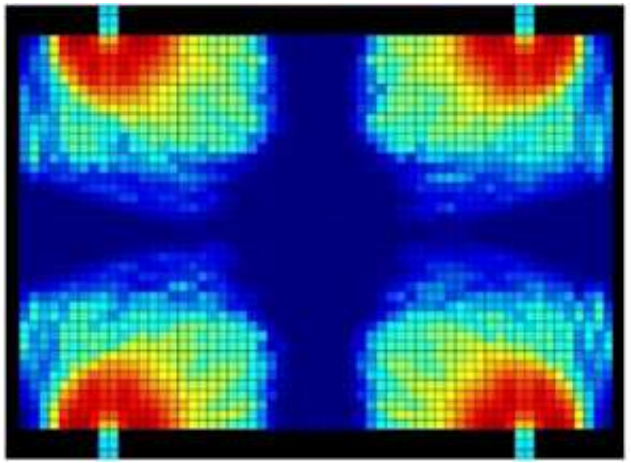
Modèles pour l'évacuation

Modèle macroscopique : Échelle d'une foule

Modèle MARCOE-PAULO (Thomas Gasparotto, LEMTA, UL)







Modèles pour l'évacuation

Modèle macroscopique : Échelle d'une foule

Interactions entre le feu et une foule

- Définition de seuils de gêne et de tenabilité

Contraintes	Seuil de gêne $\alpha = 0$	Seuil de tenabilité $\alpha = 1$
Température	40°C	60°C
Densité de flux	500 W/m^2	2.5 kW/m^2
Coefficient d'extinction	-	0.6 m^{-1}

- Impacts sur l'évacuation

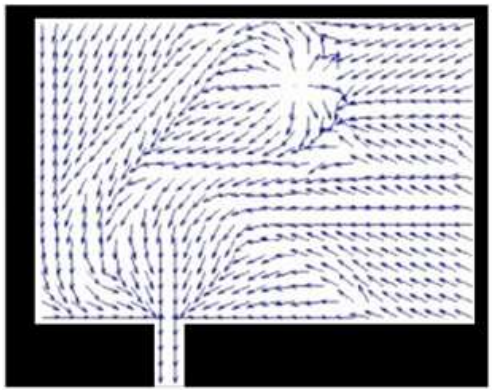
Contraintes	Direction	Vitesse	Obstacle
Température	X	X	
Densité de flux	X	X	
Coefficient d'extinction	X		X

Modèles pour l'évacuation

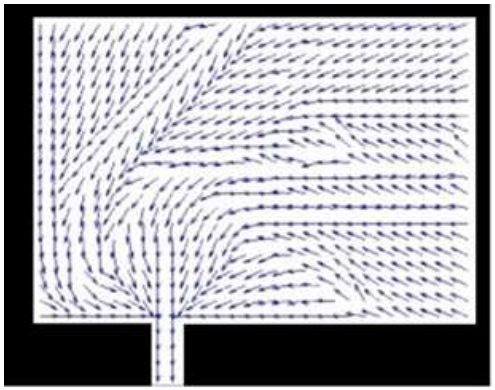
Modèle macroscopique : Échelle d'une foule

Modification du modèle de base :

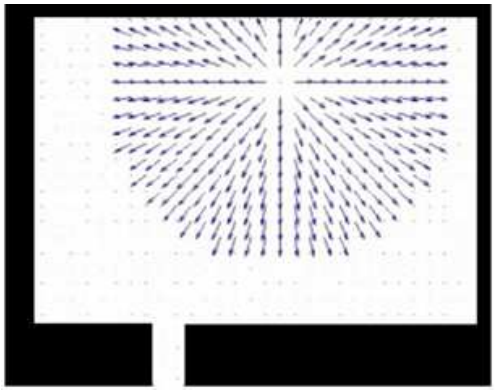
$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \boldsymbol{v}) = 0 \\ \boldsymbol{v} = V(\rho)\, \boldsymbol{U}_r \end{cases} \quad \text{avec} \quad \boldsymbol{U}_r = \frac{(1-\alpha)\,\boldsymbol{U} + \alpha \boldsymbol{U}_{th}}{||(1-\alpha)\,\boldsymbol{U} + \alpha \boldsymbol{U}_{th}||}$$



$\boldsymbol{U}_r$



$\boldsymbol{U}$



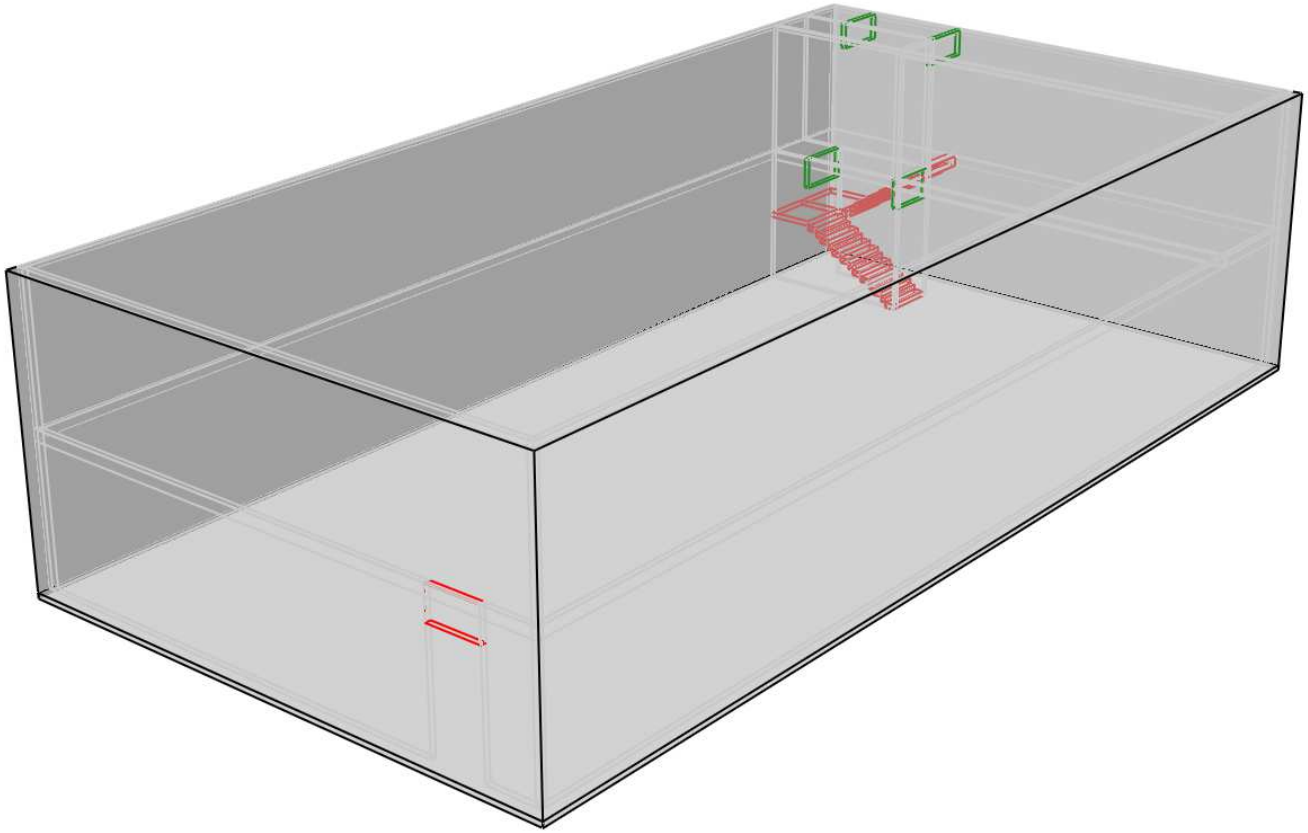
$\boldsymbol{U}_{th}$

avec $\boldsymbol{U}_{th} = -\dfrac{\boldsymbol{grad}\, T}{||\boldsymbol{grad}\, T||}$ ou $\boldsymbol{U}_{th} = -\dfrac{\boldsymbol{grad}\Phi}{||\boldsymbol{grad}\Phi||}$

Modèles pour l'évacuation

Modèle macroscopique : Échelle d'une foule

Présence de 26 personnes au 1er étage et au RdC (sans incendie)



Simulations LEMTA/UL

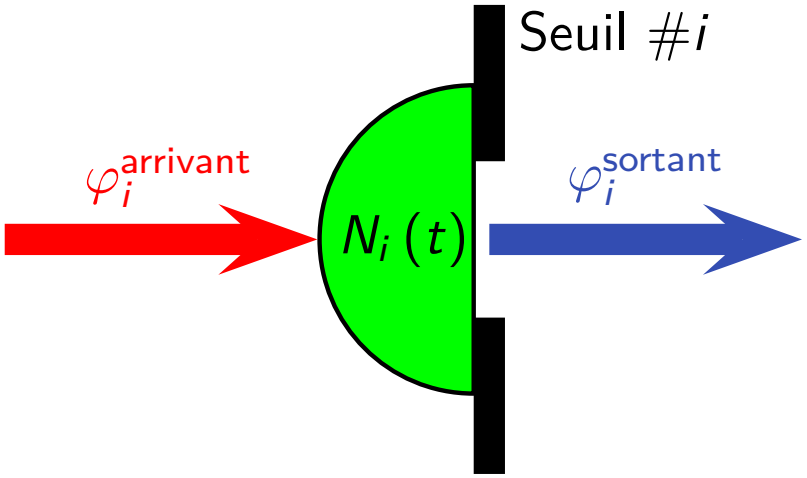
Modèles pour l'évacuation

Modèle mésoscopique : Échelle d'une pièce

Objectifs : quantifier les "files" d'attente aux points de congestion

Bilan au seuil de porte $\#i$ (N_i : nombre de personnes)

$$\frac{\mathrm{d}\, N_i(t)}{\mathrm{d}\, t} = \varphi_i^{\text{arrivant}}(t) - \varphi_i^{\text{sortant}}(t)$$

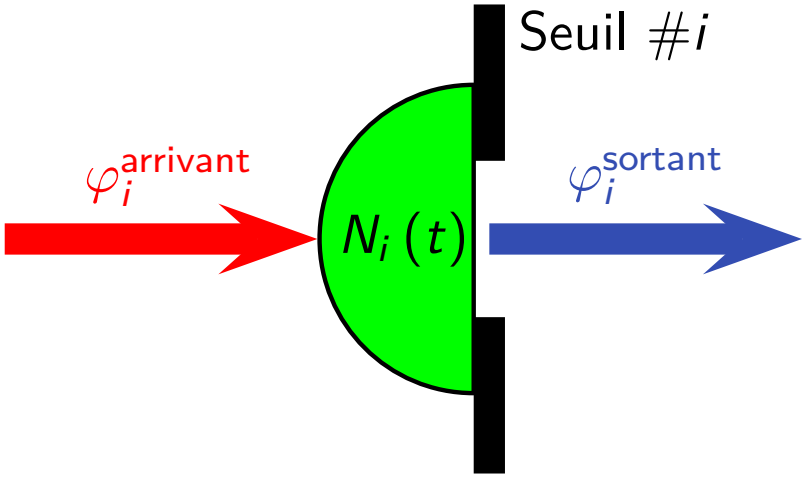


avec $\varphi_i^{\text{arrivant}}$ et $\varphi_i^{\text{sortant}}$ exprimés en Pers/s et N_i en Pers.

Modèles pour l'évacuation

Modèle mésoscopique : Échelle d'une pièce

$$\frac{\mathrm{d}\, N_i(t)}{\mathrm{d}\, t} = \varphi_i^{\text{arrivant}}(t) - \varphi_i^{\text{sortant}}(t)$$



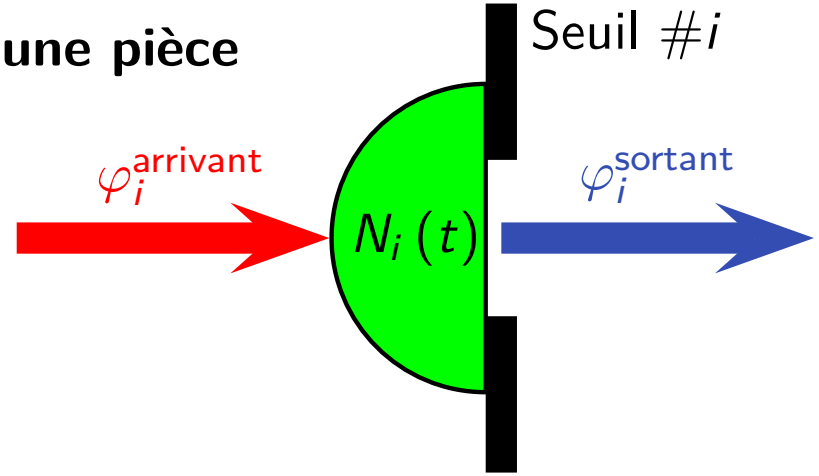
Flux sortant :

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

La densité de flux maximale au seuil est fixée à 1,10 Pers/s/m

Modèles pour l'évacuation

Modèle mésoscopique : Échelle d'une pièce



$$\frac{\mathrm{d}\, N_i(t)}{\mathrm{d}\, t} = \varphi_i^{\text{arrivant}}(t) - \varphi_i^{\text{sortant}}(t)$$

Flux arrivant :

$$\varphi_i^{\text{arrivant}}(t) = \varphi^{\text{pièce } \#i}(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{\text{Nb seuils}} \alpha_{ji} \varphi_j^{\text{sortant}}(t - \Delta\tau_{ji})$$

$\varphi^{\text{pièce } \#i}$: solution analytique pour "évacuer" la pièce ;

α_{ji} : part du flux sortant de $\#j$ allant sur $\#i$ (entre 0 et 1) ;

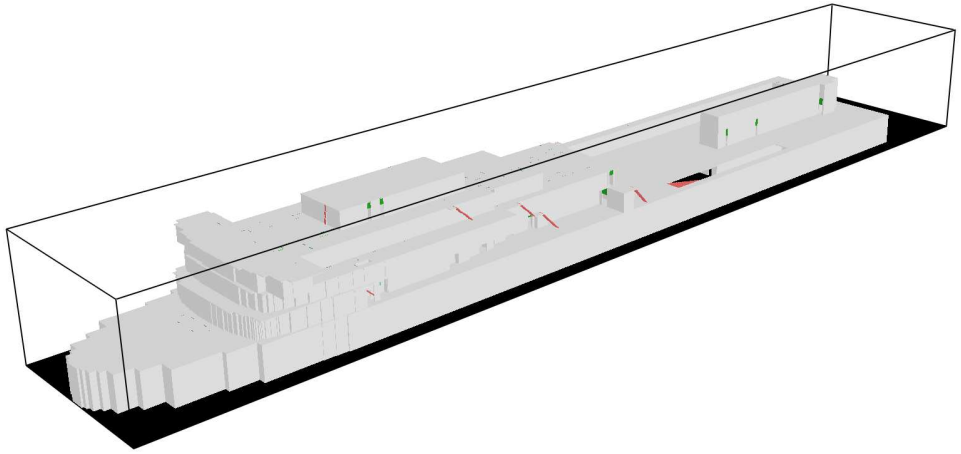
$\Delta\tau_{ji}$: temps pour rejoindre $\#i$ partant de $\#i$;

Utilisation d'un algorithme de "pathfinding" pour déterminer α_{ji} et $\Delta\tau_{ji}$ avec une vitesse de marche unique, 1,02 m/s

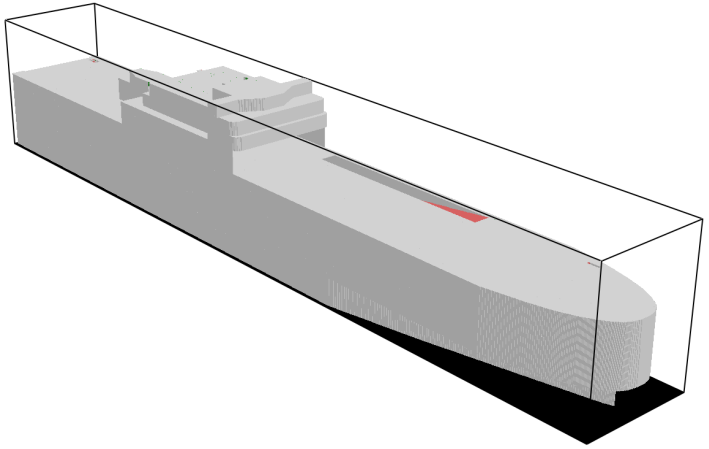
Modèles pour l'évacuation

Modèle mésoscopique : Échelle d'une pièce

Application du modèle AMERIGO aux navires



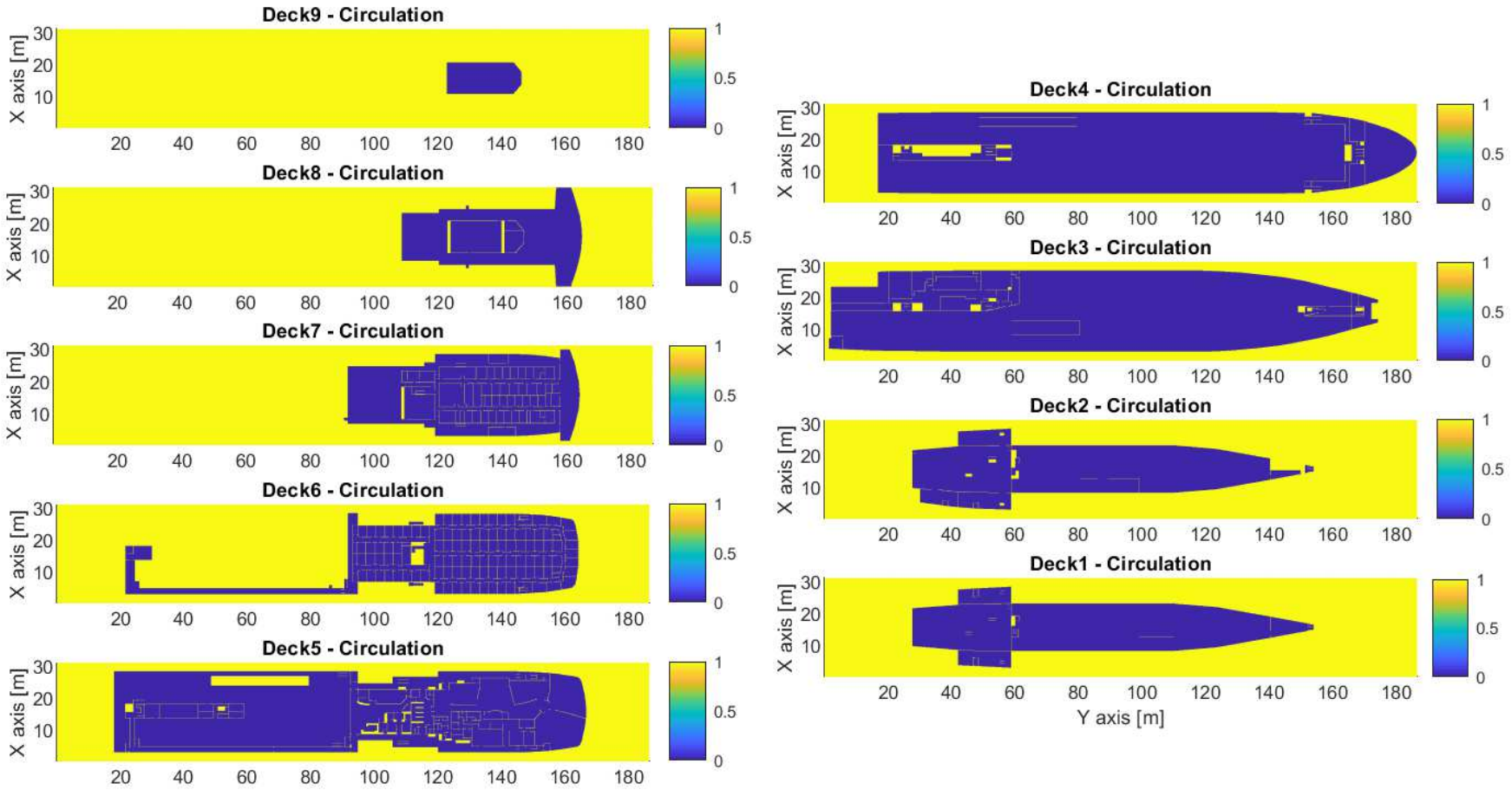
Stena Flavia



Magnolia Seaway

Modèles pour l'évacuation

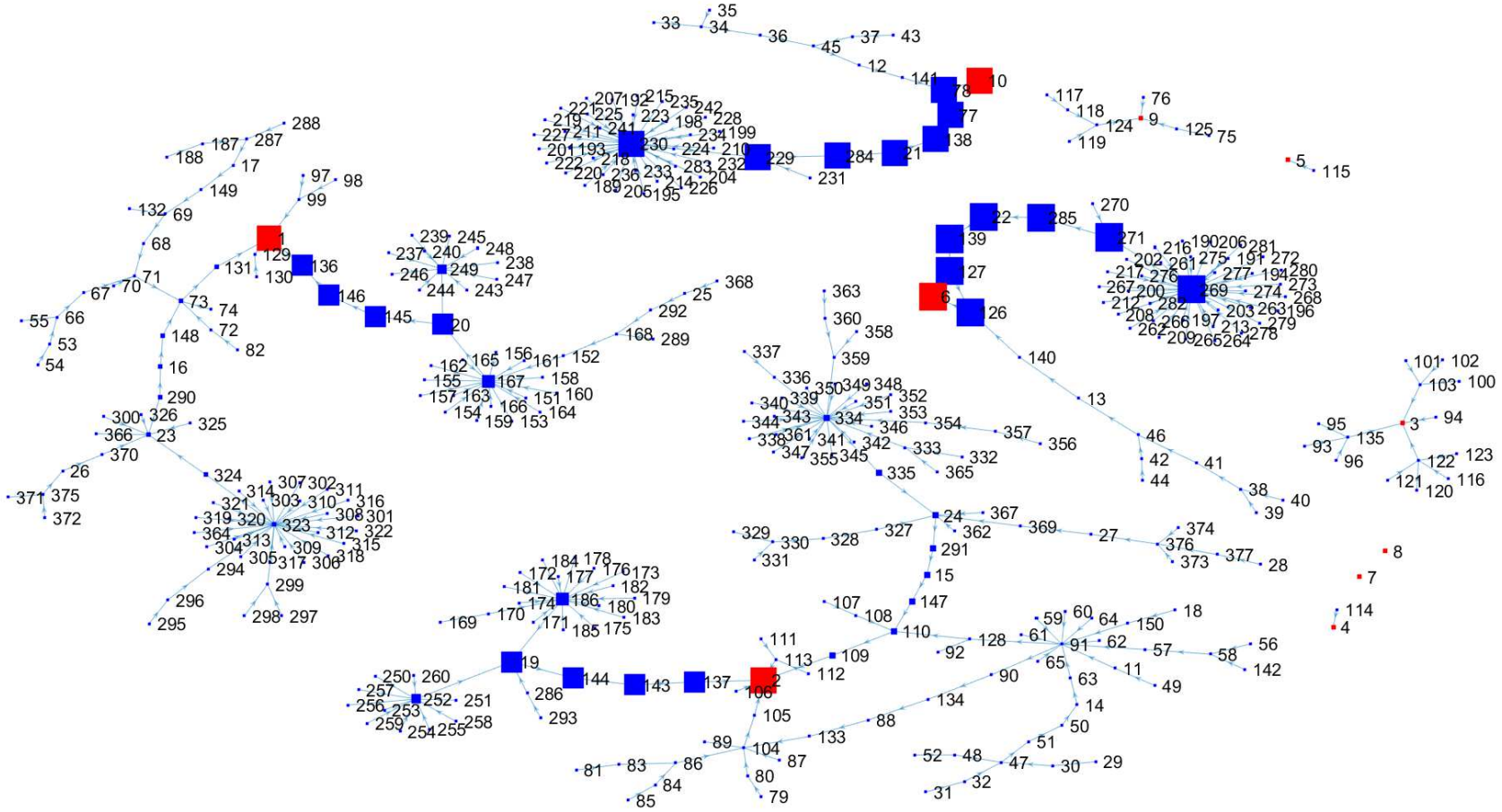
Modèle mésoscopique : Application de AMERIGO aux navires



Plan de circulation au sein du bâtiment

Modèles pour l'évacuation

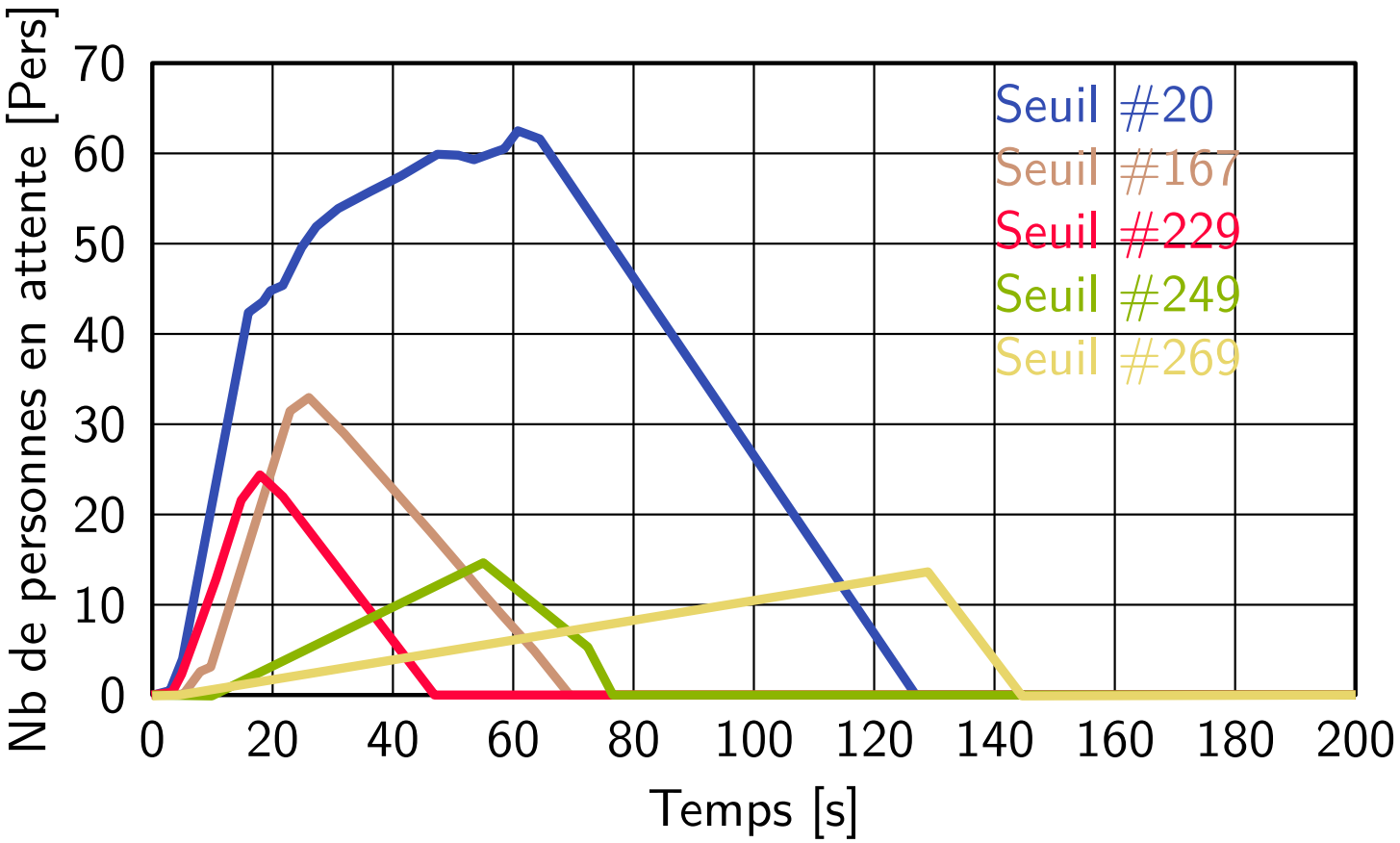
Modèle mésoscopique : Application de AMERIGO aux navires



Graphe des connexions entre seuils de porte

Modèles pour l'évacuation

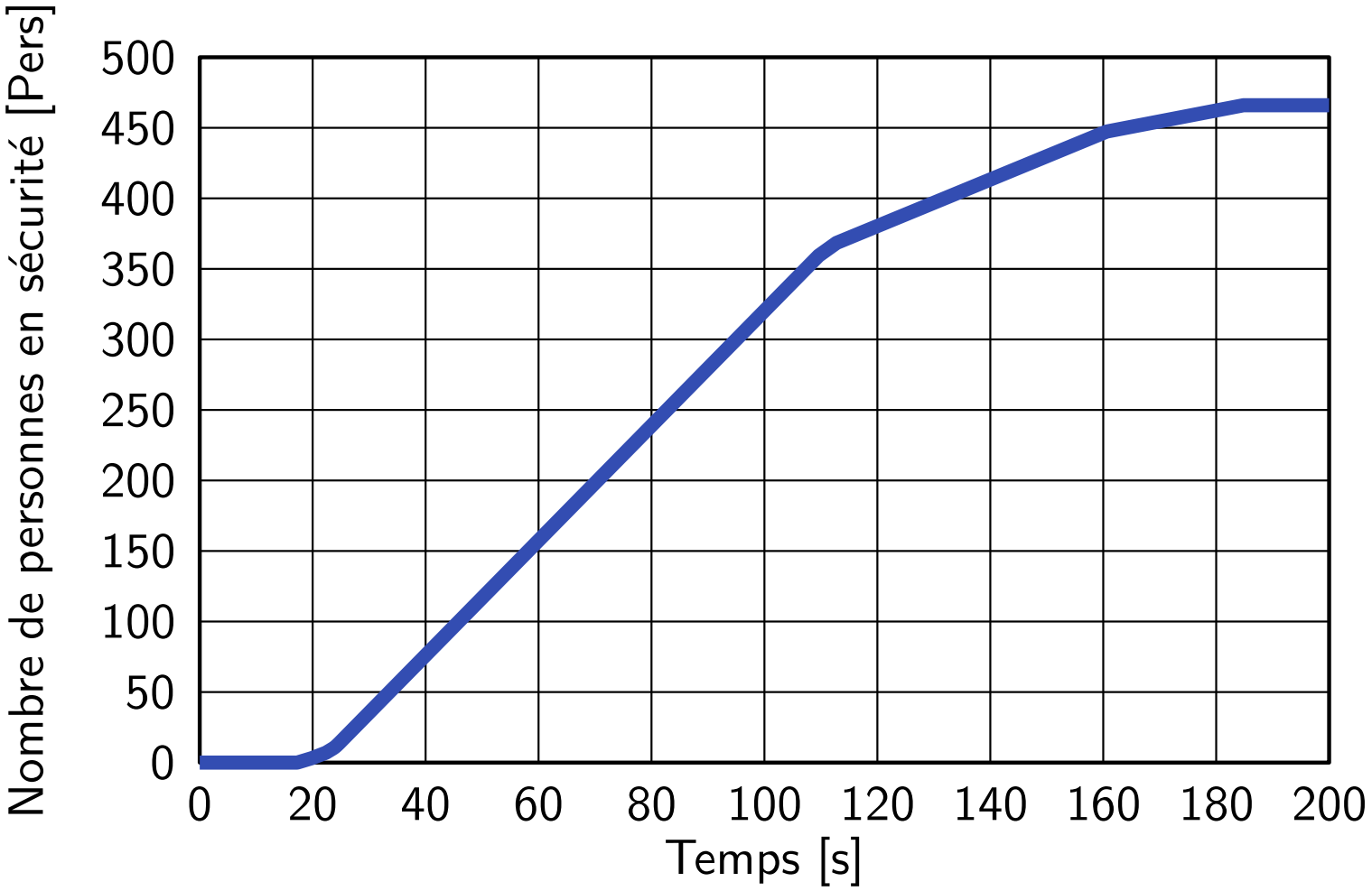
Modèle mésoscopique : Application de AMERIGO aux navires



Identification des 5 seuils les plus engorgés

Modèles pour l'évacuation

Modèle mésoscopique : Application de AMERIGO aux navires

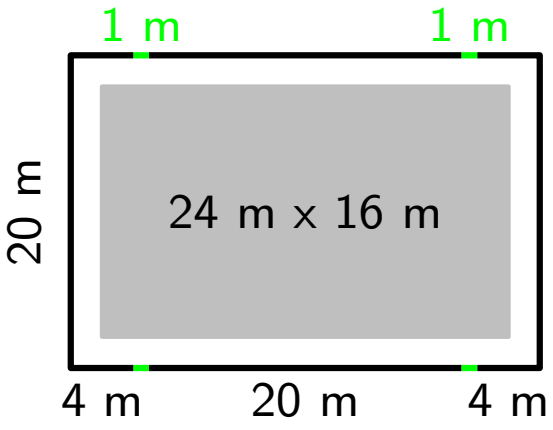


Distribution des personnes évacuées

Modèles pour l'évacuation

Inter-comparaison de modèle. Cas test #9 de l'IMO.

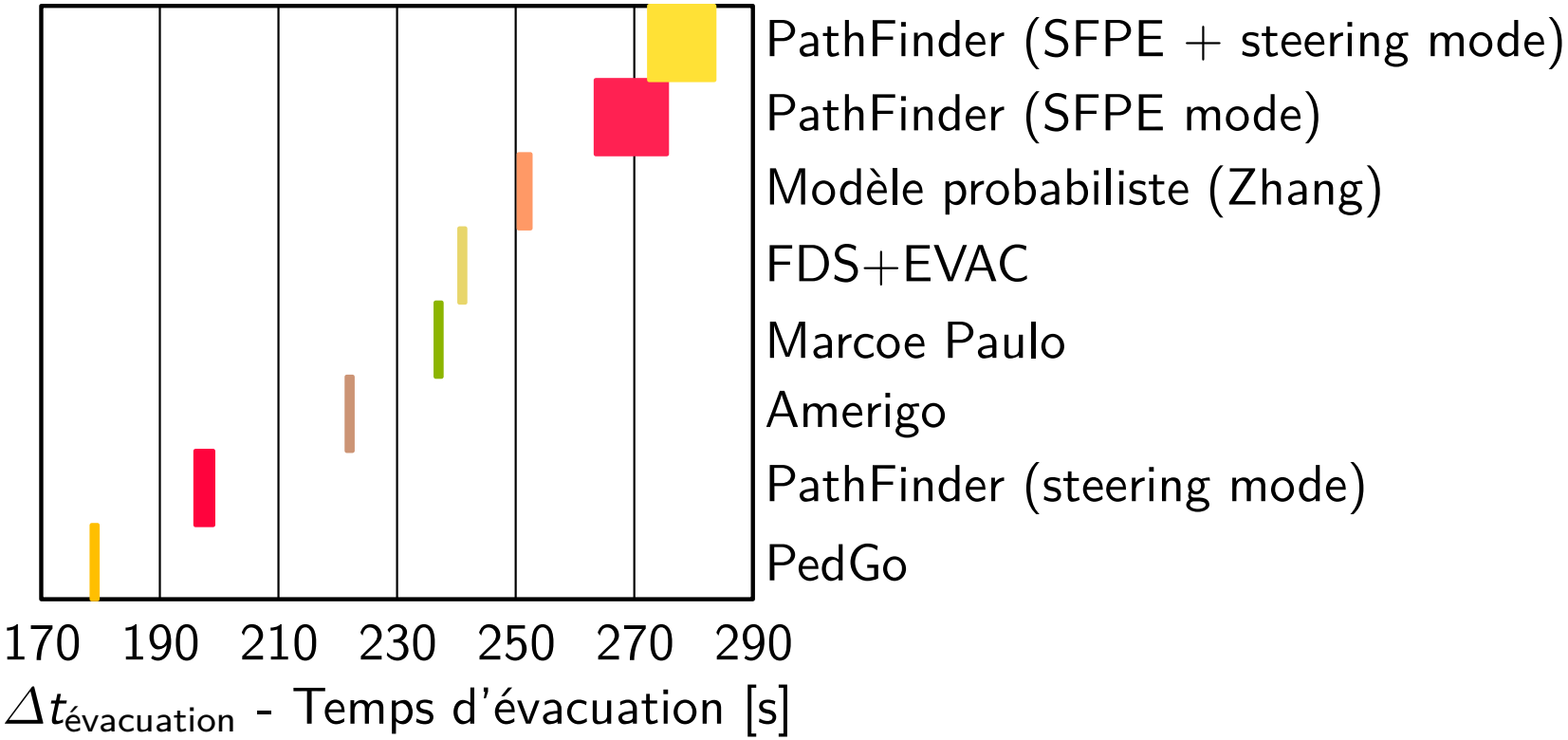
- Effectif : 1 000 personnes ;
- Distribution initiale aléatoire de la position des agents ;
- Distribution uniforme des vitesses entre 0,97 et 1,62 m/s (valeur moyenne de 1,29 m/s).



IMO MSC.1/Circ.1533

Modèles pour l'évacuation

Inter-comparaison de modèle. Cas test #9 de l'IMO.



Critères de validation :

- les occupants se répartissent de manière homogène entre les dégagements ;
- le temps d'évacuation estimé est de 232 ± 52 s !

Bilan sur l'évacuation

Comportement humain.

- au cœur de la problématique pour définir les $\Delta t_{\text{prise de cons.}}$ et $\Delta t_{\text{réaction}}$;
- décisionnel sur les stratégies d'évacuation, sur $\Delta t_{\text{mouvement}}$;

Travaux de recherche nécessaires pour rajouter de la vraisemblance à nos modèles

Modèles numériques.

- plus l'échelle d'observation est petite, plus il est nécessaire de posséder des caractéristiques détaillées pour modéliser les occupants ;
- par le changement d'échelle, pertes d'informations et donc difficultés de couplage avec les contraintes incendies ;
- le choix du modèle doit dépendre des objectifs des études à réaliser.

ÉVACUATION

Anthony COLLIN
anthony.collin@univ-lorraine.fr

LEMTA/Polytech Nancy - Université de Lorraine

ESIA 2022, La Londe les Maures, 03 juin 2022