

# Modélisation macroscopique de l'évacuation des personnes en situation d'incendie

Thomas GASPAROTTO<sup>1,2\*</sup>, Anthony COLLIN<sup>1</sup>, Pascal BOULET<sup>1</sup>, Grégoire PIANET<sup>2</sup>, Armelle MULLER<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée  
UMR CNRS 7563, Université de Lorraine  
2 Avenue de la Forêt de Haye, TSA 60604, 54518 Vandoeuvre-lès-Nancy

<sup>2</sup>CNPP  
Route de la Chapelle Réanville – 27950 Saint-Marcel  
\*(auteur correspondant : [thomas.gasparotto@univ-lorraine.fr](mailto:thomas.gasparotto@univ-lorraine.fr))

**Résumé** – Cette communication s'intéresse au développement d'un modèle d'évacuation des personnes basé sur une représentation macroscopique d'une population en situation d'incendie. Ce modèle repose sur l'advection de la densité de personnes dans un champ de vitesses 2D, avec prise en compte de contraintes spécifiques aux mouvements de personnes (vitesse de marche souhaitée, contrainte de congestion). La particularité de ce modèle est la possibilité de prendre en compte les effets du feu sur les personnes, notamment en termes de flux thermiques, de température et d'opacité des fumées.

## Nomenclature

$t$	temps, $s$	$\rho_{lim}$	densité de personnes critique, $m^{-2}$
$t_{n\%}$	temps d'évacuation de $n\%$ de la population, $s$	$\tau$	temps de réaction, $s$
$v, \vec{v}$	vitesse réelle, $m.s^{-1}$	$\psi$	flux de personnes, $s^{-1}$
$V, \vec{V}$	vitesse souhaitée, $m.s^{-1}$	$\psi_{lim}$	flux de personnes limite, $s^{-1}$
$V_0$	norme de la vitesse souhaitée, $m.s^{-1}$		<i>Opérateurs</i>
	<i>Symboles grecs</i>	$P_{C\rho}$	projection sur l'espace des vitesses admissibles
$\beta$	coefficient d'extinction, $m^{-1}$		<i>Indices et exposants</i>
$\mu$	excédent de densité, $m^{-2}$	$i, j$	indices des cellules
$\rho$	densité de personnes, $m^{-2}$		

## 1. Introduction

Depuis le début des années 1970, de nombreux modèles d'évacuation de personnes basés sur diverses approches ont vu le jour. Ces modèles ont pour objectif de prédire le déroulement du processus d'évacuation associé à un scénario donné, et en particulier le temps nécessaire pour l'évacuation d'un bâtiment.

Les premières tentatives de modélisation en évacuation reposaient sur des formulations empiriques liant la vitesse de déplacement d'un groupe d'individus à la densité de personnes (modèles de Togawa [1], de Pauls [2]). Les progrès de la simulation numérique et les études menées sur le comportement humain ont ensuite permis d'envisager une représentation discrète des individus, dans laquelle chaque personne est considérée comme une entité individuelle dont le mouvement est régi par des lois plus ou moins complexes. Parmi ces modèles microscopiques, on peut citer les modèles lagrangiens orientés agents (modèles de FDS+Evac [3], Simulex, Pathfinder) ou les automates cellulaires reposant sur une discrétisation spatio-temporelle et des lois de transition d'une cellule à une autre (Blue et Adler [4], Klüpfel [5], Tissera [6]). Au sein de ces catégories, on distingue également les modèles déterministes, dans lesquels les paramètres d'entrée et les règles de cheminement

sont parfaitement connus, et les modèles stochastiques dans lesquels les paramètres d'entrée sont issus de distributions statistiques avec un mode de cheminement de type probabiliste. Kuligowski et Peacock proposent une revue détaillée et une classification des modèles et outils numériques dédiés à l'évacuation [7].

L'utilisation des modèles microscopiques, qui sont actuellement majoritaires, suppose une dépendance des résultats vis-à-vis du scénario considéré, et notamment de la distribution initiale de personnes et de leurs caractéristiques individuelles. Ainsi, l'obtention de grandeurs moyennes (flux de personnes, temps d'évacuation) nécessite la simulation d'un très grand nombre de scénarios différents, ce qui constitue une contrainte non négligeable en termes de temps de calcul et de traitement statistique des résultats.

Le modèle que l'on présente ici a été mis en place pour pallier ce problème, dans l'optique d'une utilisation en Ingénierie de Sécurité Incendie. Il repose sur une représentation macroscopique des individus et a pour objectif de fournir, en une seule simulation, des résultats représentatifs d'un grand nombre de scénarios particuliers. Des travaux de validation expérimentale et de comparaison avec le code FDS+Evac sont également présentés.

## 2. Présentation du modèle

### 2.1. Hypothèses de base

Le modèle d'évacuation est basé sur une approche macroscopique, dans laquelle on s'intéresse à l'évolution de la densité de personnes  $\rho$ . Les hypothèses fondatrices de ce modèle sont extraites en partie des travaux de Roudneff-Chupin [8] :

- 1) En l'absence de toute contrainte extérieure, les personnes se déplacent à leur vitesse de marche souhaitée.
- 2) Les individus respectent une contrainte de congestion maximale : la densité de personnes  $\rho$  ne peut pas excéder localement une densité critique  $\rho_{lim}$ .
- 3) Le flux de personnes aux ouvrants ne peut dépasser un certain flux limite  $\psi_{lim}$ .

### 2.2. Formulation mathématique

Du point de vue mathématique, le problème prend la forme d'une équation de conservation de la densité de personnes  $\rho$ , transportée dans un champ de vitesses  $\vec{v}$  [8] :

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0 & (1) \\ \vec{v} = P_{C_\rho} \vec{V} & (2) \end{cases}$$

La vitesse  $v$  de déplacement des personnes est évidemment inférieure ou égale à leur vitesse souhaitée  $V$  du fait de l'encombrement généré par la présence des autres personnes. Les vitesses réelles  $\vec{v}$  correspondent ici à la projection des vitesses souhaitées  $\vec{V}$  sur l'espace  $C_\rho$  des vitesses admissibles au sens des moindres carrés.

La modélisation du cheminement des personnes nécessite également l'introduction de 4 constantes :

- la vitesse de marche libre (sans contrainte)  $V_0$  : variable selon l'âge et la culture (fixé par la suite à  $1,25 \text{ m.s}^{-1}$ ),
- le temps de réaction et de pré-mouvement  $\tau$  : variable selon la perception du danger par les individus,
- la densité critique  $\rho_{lim}$ , fixée ici à 5,4 personnes par mètre carré,
- le flux limite  $\psi_{lim}$  à travers une unité de passage, fixé ici à 1,1 personnes par seconde.

### 2.3. Méthode de résolution en absence de feu

En absence de toute contrainte liée à l'incendie, la mise en place du problème et sa résolution numérique se font selon le schéma présenté sur la figure 1 [9] :

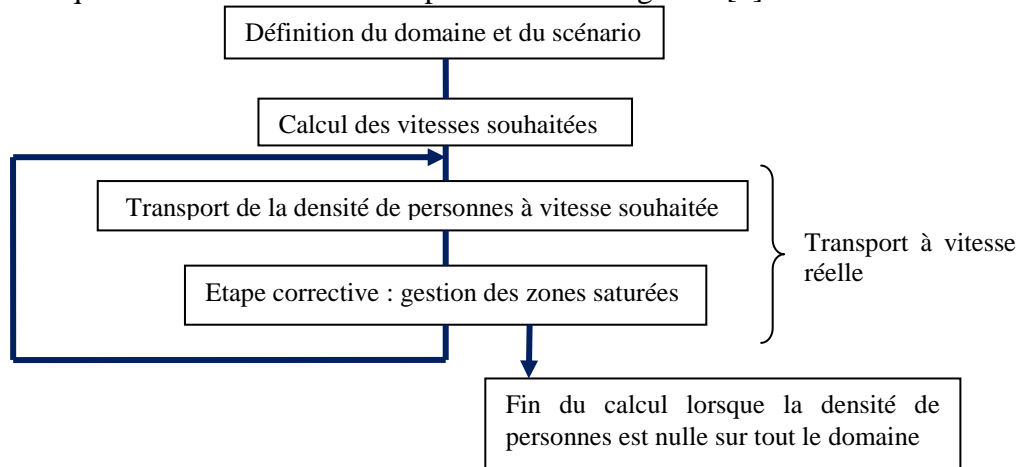


Figure 1 : *Algorithme de résolution du problème (en absence de contrainte liée au feu)*

#### 2.3.1. Définition du domaine et du scénario

Le domaine de calcul est discrétisé en cellules carrées, comme représenté sur la figure :

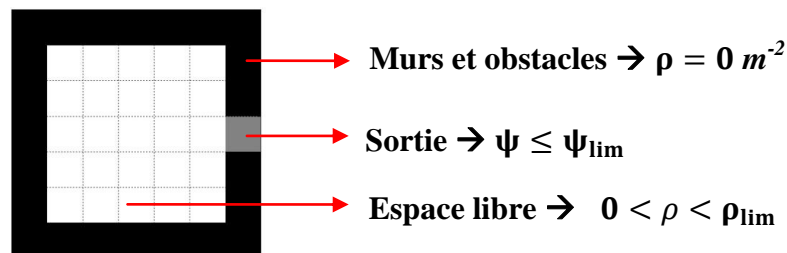


Figure 2 : *Définition de la géométrie et discrétisation*

On distingue trois types de cellules :

- les cellules « murs et obstacles », dans lesquelles la densité de personnes est nulle,
- les cellules « sorties », caractérisées par le flux limite  $\psi_{lim}$ ,
- les cellules « libres » à la circulation, caractérisées par la densité critique  $\rho_{lim}$ .

A l'instant initial, la densité de personnes est répartie de façon uniforme sur le domaine de calcul (scénario moyen).

#### 2.3.2. Calcul des vitesses souhaitées

Le calcul des vitesses souhaitées pour l'évacuation s'appuie sur un constat simple : les individus cherchent à minimiser leur temps de parcours vers la sortie [10]. On fait l'hypothèse ici que les individus connaissent parfaitement les lieux. En chaque cellule du domaine, la vitesse souhaitée est donc dirigée selon le chemin le plus court menant à la sortie la plus proche. Ce chemin est calculé grâce à l'algorithme de Dijkstra à partir d'une cellule quelconque vers la sortie la plus proche, en tenant compte des spécificités de la géométrie (murs, obstacles). Un exemple de champ de vitesses souhaitées est représenté sur la figure 3, pour un local avec deux murs intérieurs et une sortie.

### 2.3.3. Transport à vitesse souhaitée

Une fois le champ des vitesses souhaitées défini, la densité de personnes est transportée dans ce champ de vitesses selon l'équation (1). La résolution numérique de cette équation est effectuée grâce à un schéma de type volumes finis explicite en temps et une interpolation de second ordre en espace (schéma Quick). Le transport de la densité de personnes au niveau d'une sortie vers l'extérieur du domaine de calcul est soumis au flux limite  $\psi_{lim}$ .

### 2.3.4. Gestion de la saturation

Après l'étape de transport à vitesse souhaitée, une étape corrective est mise en place afin de gérer le cas éventuel des cellules saturées (c'est-à-dire dans lesquelles la densité de personnes excède la densité critique  $\rho_{lim}$ ). Pour chaque cellule saturée  $(i,j)$ , on effectue une marche aléatoire stochastique définie de la façon suivante [9] :

1. On calcule l'excédent de densité  $\mu(i,j) = \rho(i,j) - \rho_{lim}$
2. On tire au sort l'un des quatre voisins de la cellule  $(i,j)$
3. On y dépose la part maximale de l'excédent  $\mu(i,j)$  permettant d'y respecter la contrainte de congestion maximale.
4. On poursuit la marche aléatoire à partir de la nouvelle cellule jusqu'à ce que l'excédent soit totalement dissipé.

Cette étape corrective, illustrée sur la figure 4, correspond mathématiquement à l'équation (2), c'est-à-dire à la projection des vitesses souhaitées sur le champ des vitesses admissibles vis-à-vis de la contrainte de congestion.

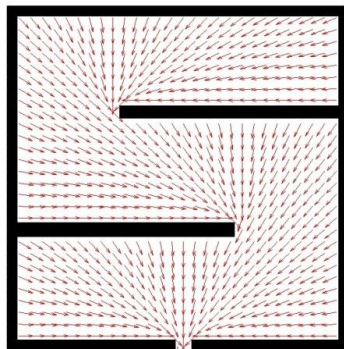


Figure 3 : Exemple de champ de vitesses souhaitées

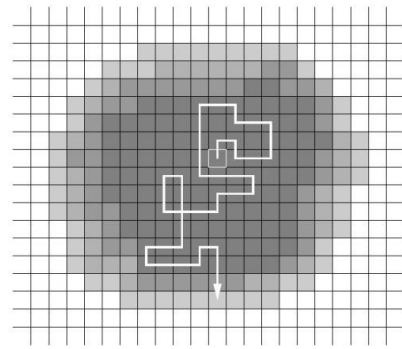


Figure 4 : Illustration d'une marche aléatoire stochastique pour une cellule saturée [9]

## 2.4. Intégration des contraintes liées à l'incendie

L'originalité de ce modèle d'évacuation réside dans sa capacité à prendre en compte les effets du feu sur les personnes. Différents types de contraintes sont susceptibles d'avoir un impact sur les individus et sur leur évacuation :

- la température : les fortes températures peuvent entraîner une hyperthermie par débordement de la thermorégulation corporelle, ainsi qu'une atténuation des capacités mentales ;
- le flux thermique : les flux thermiques élevés entraînent des brûlures de la peau et des voies respiratoires ;
- la visibilité : l'opacité des fumées d'incendie provoque une diminution de la visibilité, et donc une perte de repères et d'informations pour les individus en train d'évacuer.

D'autres effets plus complexes mais relativement rares [11] et non pris en compte ici (comportements irrationnels, notion de panique) peuvent occasionnellement être observés en situation d'incendie.

Les contraintes relatives à l'incendie sont intégrées dans le modèle de trois façons différentes :

1. Les cellules enflammées sont considérées comme des obstacles
2. Les cellules dans lesquelles les contraintes thermiques et optiques dépassent les seuils de tenabilité définis dans le tableau 1 sont considérées comme des obstacles :

Type de contrainte	Température	Flux thermique	Coefficient d'extinction
Seuil de tenabilité	60°C	2,5 kW.m <sup>-2</sup>	0,3 m <sup>-1</sup>

Tableau 1 : *Seuils de tenabilité utilisés dans le modèle*

3. Les vitesses de transport sont pénalisées en fonction du coefficient d'extinction local  $\beta$  (m<sup>-1</sup>) du milieu, selon la loi établie par Frantzich et Nilsson [12]:

$$v(\beta) = V_0(1 - 0,0807\beta)$$

Cette prise en compte des effets du feu est rendue possible par un couplage avec le code de calcul Fire Dynamics Simulator 6, développé par le NIST, qui permet de simuler l'incendie dans le domaine de calcul, en parallèle du code d'évacuation.

### 3. Résultats expérimentaux et numériques

#### 3.1. Validation expérimentale en absence de feu

Le modèle d'évacuation a été validé expérimentalement au LEMTA sur une configuration très simple : une pièce de 10m<sup>2</sup> (4 m de long et 2,5 m de large), munie d'une seule sortie (figure 5). Une caméra GoPro placée au niveau de la sortie permet de relever les temps de passages des personnes et d'en déduire le pourcentage de personnes évacuées au cours du temps. Les positions et orientations initiales des 5 personnes sont tirées aléatoirement et le départ de l'évacuation est donné par un signal sonore.

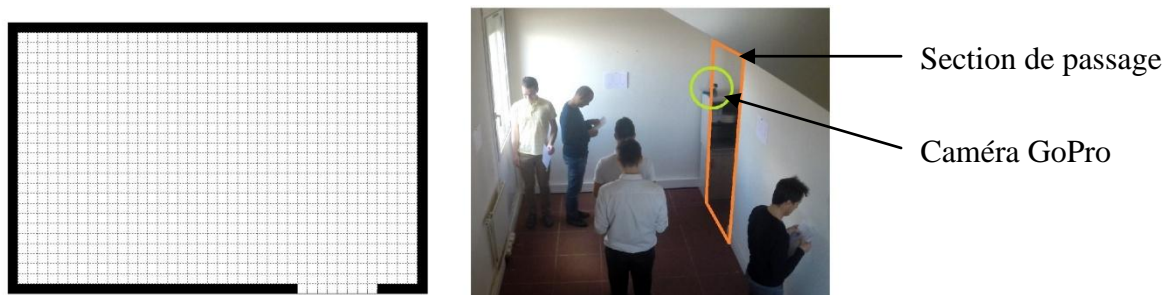


Figure 5 : *Présentation du dispositif expérimental*

##### 3.1.1. Identification de la vitesse de marche et du temps de réaction

Objectif : déterminer, pour cette configuration expérimentale, la vitesse de marche sans contrainte et le temps de réaction moyen des 5 individus constituant la population.

Cent expériences d'évacuation d'une seule personne ont été réalisées, ce qui a permis de déterminer le pourcentage de personnes sorties au cours du temps. L'expression analytique de

ces taux de sortie a permis l'identification au sens des moindres carrés (figure 6) de la vitesse de marche  $V_0$  et du temps de réaction  $\tau$  moyens des 5 individus :

$$V_0 = 0,91 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \qquad \tau = 0,69 \text{ s}$$

### 3.1.2. Validation

Objectif : valider le modèle d'évacuation à partir de 20 expériences réalisées avec 5 personnes, en intégrant dans le code numérique les valeurs de  $V_0$  et de  $\tau$  déterminées expérimentalement.

La figure 7 présente les taux de sorties au cours du temps, moyennés sur les 20 expériences, ainsi que les taux de sortie obtenus numériquement avec prise en compte de la congestion et analytiquement sans traiter la congestion.

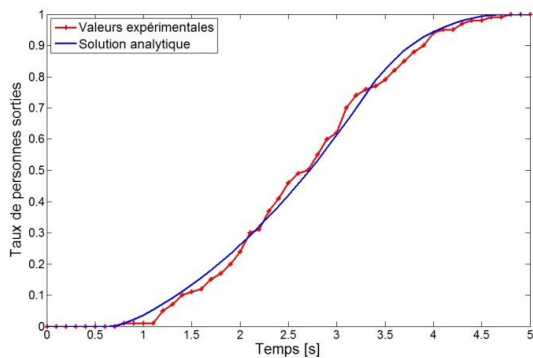


Figure 6 : Identification de la vitesse de marche sans contrainte et du temps de réaction

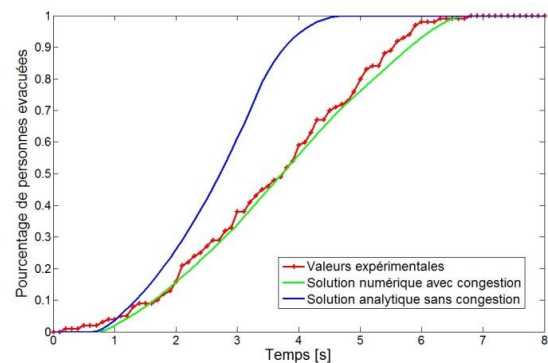


Figure 7 : Validation du code à partir de 20 expériences

Ces résultats procurent deux enseignements importants :

- La prise en compte numérique de la congestion observée expérimentalement semble tout à fait pertinente à ce stade.
- Le taux d'évacuation calculé numériquement à partir d'une seule simulation d'un scénario moyen (distribution initiale de personnes uniforme) est conforme aux taux de sortie obtenus à partir de 20 expériences menées avec des distributions aléatoires de personnes.

## 3.2. Prise en compte du feu et comparaison avec le code FDS 6+Evac

Objectif : simuler l'évacuation en situation d'incendie d'un compartiment avec le modèle macroscopique présenté, et confronter le taux d'évacuation à celui obtenu à partir du traitement statistique de 30 simulations réalisées avec le code microscopique FDS 6+Evac (qui prend en compte les contraintes optiques et toxiques de l'incendie).

La configuration retenue, visible sur la figure 10, correspond à un test couramment utilisé pour la vérification et la validation des modèles d'évacuation [13]. La géométrie correspond à un ensemble de cabines de bateaux ouvertes, dont l'une renferme un foyer de puissance nominale 1MW, et dont la puissance suit la courbe du référentiel NFPA 204 pour une croissance moyenne (puissance nominale atteinte pour  $t=300 \text{ s}$ ). Les figures 8 et 9 représentent respectivement les champs de température et d'extinction calculés par FDS 6 dans le compartiment à une hauteur de  $1,8 \text{ m}$  pour un temps  $t=300 \text{ s}$  après le départ de feu.

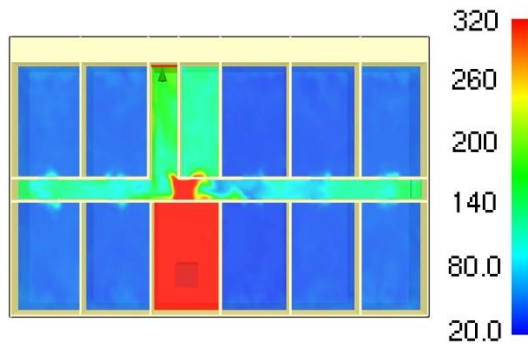


Figure 8 : Champ de température ( $^{\circ}\text{C}$ ) à 1,8 m de hauteur pour  $t=300$  s

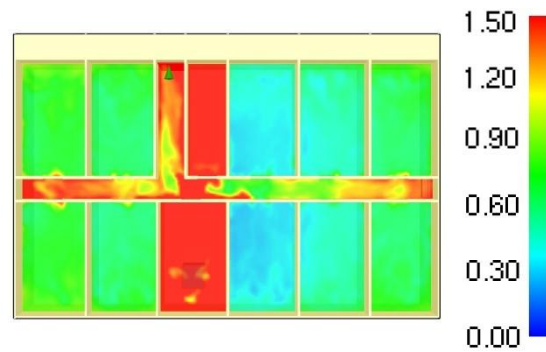


Figure 9 : Champ de coefficient d'extinction ( $\text{m}^{-1}$ ) à 1,8 m de hauteur pour  $t=300$  s

Les paramètres d'entrée utilisés pour les simulations sont les suivants :

- Temps de réaction/pré-mouvement : 30 s
- Effectif initial de 23 personnes uniformément distribuées

La figure 11 représente les taux d'évacuation au cours du temps pour les deux modèles, et le tableau 2 compare les temps intermédiaires d'évacuation obtenus avec chaque modèle ( $t_{n\%}$  représente le temps au bout duquel  $n$  % de l'effectif initial est sorti).

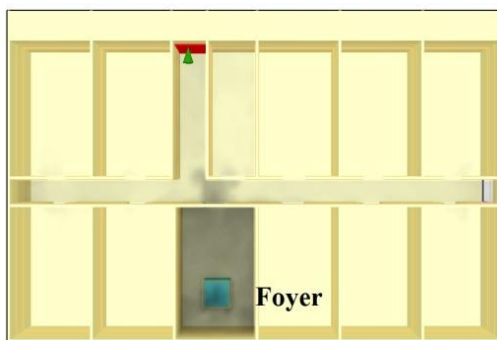


Figure 10 : Schéma de la configuration utilisée

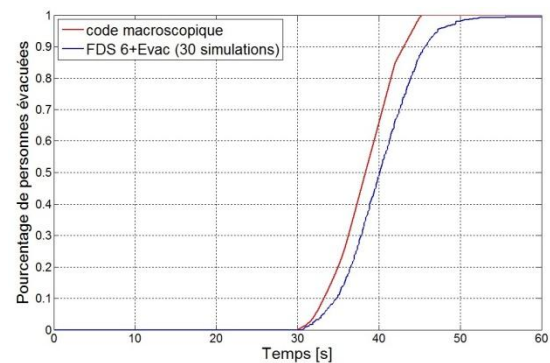


Figure 11 : Comparaison des taux d'évacuation calculés avec les deux codes

Les taux d'évacuation au cours du temps ont la même allure pour les deux modèles, avec dans chaque cas la mise en évidence d'un flux maximal lorsque la congestion apparaît au niveau des issues. Les différences observables peuvent être expliquées en partie par les hypothèses différentes effectuées pour la recherche de chemin :

- Code macroscopique : Hyperconnaissance des lieux, donc choix de la sortie la plus proche du point de départ.
- FDS 6+Evac : Choix de la sortie visible la plus proche, avec actualisation du choix au cours du chemin à partir de sous-modèles de fiabilité invérifiable.

	$t_{50\%}$	$t_{75\%}$	$t_{90\%}$	$t_{95\%}$
FDS+Evac	40,1s	43,2s	45,7s	47,2s
Code macroscopique	38,4s	41s	43,1s	44,1s

Tableau 2 : Comparaison des temps intermédiaires d'évacuation

Les tendances sont assez proches, confirmant l'intérêt de poursuivre avec notre modèle macroscopique, en particulier en perfectionnant le modèle d'évaluation de la visibilité, généralement basé sur des grandeurs locales et de ce fait perfectible.

## 4. Conclusion

Un modèle macroscopique d'évacuation des personnes avec prise en compte des effets de l'incendie a été mis en place, codé, validé expérimentalement à petite échelle et mis en œuvre sur des cas tests. Ce modèle, destiné à une utilisation en Ingénierie de Sécurité Incendie, présente l'avantage de fournir, à partir d'une unique simulation d'un scénario moyen, des résultats quantitatifs (temps d'évacuation) représentatifs du très grand nombre de scénarios susceptibles de se produire lors d'un incendie. Il permet ainsi de contourner les limites des modèles microscopiques, dont le coût en temps de calcul et de traitement statistique des données de sortie constitue une restriction d'utilisation. Deux points de développement sont actuellement à l'étude et pourraient être intégrés dans ce modèle : d'une part, une évaluation pertinente des temps de réaction et de pré-mouvement, prenant en compte localement la perception du danger par les individus ; d'autre part, une évaluation fine de la visibilité (considérée comme le critère le plus influent sur les décisions des individus), ainsi que son intégration dans le modèle de cheminement.

## Références

- [1] K. Togawa, Study on fire escapes based on the observation of multitude currents, *Building Research Institute, Ministry of Construction of Japan*, 1963.
- [2] J. Pauls, The movement of people in buildings and design solutions for means of egress, *Fire technology*, 20(1) : 27–47, 1984.
- [3] T. Korhonen, S. Hostikka, Fire Dynamics Simulator with Evacuation : FDS+Evac, *VTT Working Papers*, 2009.
- [4] V.J. Blue, J.L. Adler, Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways. *Transportation Research Part B : Methodological*, 35(3) : 293–312, 2001.
- [5] H.L. Kluepfel, *A cellular automaton model for crowd movement and egress simulation*, PhD thesis, Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Physik, 2003.
- [6] P. Tissera, A.M. Printista, M.L. Errecalde, Evacuation simulations using cellular automata, *Journal of Computer Science & Technology*, 7, 2007.
- [7] E.D. Kuligowski, R.D. Peacock, *A review of building evacuation models*, Technical Note 1471, National Institute of Standards and Technology, 2005.
- [8] B. Maury, A. Roudneff-Chupin, F. Santambrogio, A macroscopic crowd motion model of gradient flow type, *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences* (2010) : 1787-1821.
- [9] A. Roudneff, *Modélisation macroscopique de mouvements de foule*, PhD thesis, Université Paris Sud-Paris XI, 2011.
- [10] M. Moussaïd, D. Helbing, G. Theraulaz, How simple rules determine pedestrian behavior and crowd disasters, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(17) :6884–6888, 2011.
- [11] G. Proulx, J. Pineau, *Review of evacuation strategies for occupants with disabilities*, National Fire Laboratory, Institute for Research in Construction, National Research Council, Canada, 1996.
- [12] Frantzich, H., and Nilsson, D., “Utrymning genom tät rök: beteende och förflyttning”, 75 p., Report 3126, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Sweden, 2003.
- [13] International Maritime Organization. Guidelines for evacuation analysis for new and existing passenger ships. *MSC.1/Circ.1238*, 2007.