



HAL
open science

Modélisation du mouvement des personnes lors de l'évacuation d'un bâtiment à la suite d'un sinistre

Constantin Theos

► **To cite this version:**

Constantin Theos. Modélisation du mouvement des personnes lors de l'évacuation d'un bâtiment à la suite d'un sinistre. Sciences de la Terre. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1994. Français. NNT: . tel-00523176

HAL Id: tel-00523176

<https://pastel.hal.science/tel-00523176>

Submitted on 4 Oct 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE

PREPAREE POUR OBTENIR
LE DIPLOME DE DOCTORAT
DE L'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES
SPECIALITE: SCIENCES ET TECHNIQUES DU BATIMENT

Par
Constantin THEOS

Sujet:

Modélisation du mouvement des personnes
lors de l'évacuation d'un bâtiment
à la suite d'un sinistre

Date de soutenance: le 25 janvier 1994

JURY:	MM. Pierre JOULAIN	Président
	Yves DUTUIT	Rapporteur
	Nikolaos LIMNIOS	Rapporteur
	Michel CURTAT	Directeur de Thèse
	Jacques RILLING	Examineur
	Hervé TEPHANY	Examineur

R E M E R C I E M E N T S

Ce travail a été réalisé au sein de la division Sollicitations Thermiques et Enfumage du service Sécurité Feu du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment de Marne-la-Vallée.

De nombreuses personnes du CSTB, en particulier, les membres du service Sécurité Feu, m'ont accueilli d'une façon chaleureuse et amicale que j'ai beaucoup appréciée.

Je remercie vivement M. Joulain, Directeur de Recherche au CNRS, de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance malgré ses nombreuses activités. Mes sincères remerciements s'adressent également à M. Dutuit, Professeur à l'Université de Bordeaux I, et à M. Limnios, Professeur à l'Université de Technologie de Compiègne, pour avoir accepté - dans des conditions de délai difficiles - d'être les rapporteurs de ce mémoire de thèse.

Ce travail n'aurait jamais pu être réalisé sans mon directeur de thèse M. Curtat, Directeur de Recherche au CSTB, qui, avec efficacité et passion, m'a encadré, conseillé, et a su m'apporter un soutien précieux lors des moments difficiles de ce long parcours.

L'occasion m'est offerte de remercier ici M. Rilling, Directeur Scientifique du CSTB, non seulement pour sa participation au jury, mais aussi pour m'avoir apporté son aide dans bien d'autres circonstances, et ce pour de nombreuses et importantes questions.

M. Téphany, professionnellement concerné, en tant qu'ingénieur à la Direction de la Sécurité Civile, par les aspects réglementaires de la sécurité des personnes et par l'évolution des recherches dans ce domaine, a bien voulu examiner mon mémoire et faire partie de mon jury. Je le remercie de l'intérêt qu'il a ainsi porté à mon travail.

Mes remerciements vont également à M. Moyé, chef du Service Sécurité Feu, pour son accueil, et pour le discret et bienveillant soutien qu'il a su m'apporter chaque fois que ce fut nécessaire.

Xavier Bodart a beaucoup contribué au progrès de ce travail. Je le remercie de l'aide qu'il a toujours prodiguée avec une remarquable facilité et efficacité. Travailler avec lui a constitué en soi une expérience singulièrement enrichissante.

Je tiens également à exprimer ici mes profonds remerciements à mon ami Philippe Fromy qui, avec une modestie et une disponibilité exemplaires, m'a assisté et guidé dans mes premiers pas de chercheur-thésard.

J'adresse également mes sincères remerciements à Bernard Hognon dont l'esprit exigeant et critique incite à une remise en cause hautement bénéfique.

Je ne manquerai pas de remercier aussi Laurent Gagliardini, pour les précieux conseils qu'il a su prodiguer, avec facilité, même lorsque que le problème me paraissait compliqué.

Enfin, je n'oublierai pas de remercier les collègues et amis du CSTB qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à m'entourer de l'ambiance indispensable à la production de tout travail créatif, et notamment Marilen, Samira, Zhao, Hiam, Marc, Philippe, Ghassan,....

Modélisation du mouvement des personnes lors de l'évacuation d'un bâtiment à la suite d'un sinistre

Sommaire

PRESENTATION SOMMAIRE DU MEMOIRE DE THESE.....	1
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 L'HOMME EN PRESENCE DE L'INCENDIE DE BATIMENT.....	7
I. ASPECTS PSYCHOSOCIOLOGIQUES RELATIFS A L'EVACUATION.....	10
1.1. <i>La panique</i>	10
1.2. <i>Perception de l'environnement</i>	13
1.3. <i>"Way-Finding" (orientation spatiale)</i>	17
1.4. <i>Réactions et facultés humaines en milieu enfumé</i>	20
1.5. <i>Entraînement</i>	22
1.6. <i>Degré d'organisation de l'évacuation</i>	23
II. LE COMPORTEMENT HUMAIN DURANT L'INCENDIE.....	24
II.1. <i>Etudes du comportement humain durant l'incendie</i>	24
II.1.1. <i>Etude 1974 - 1976</i>	25
II.1.2. <i>Project People II (1981)</i>	26
II.1.3. <i>Synthèse</i>	28
II.2. <i>Modèles comportementaux</i>	28
III. <i>SYNTHESE</i>	31
CHAPITRE 2 TRAVAUX D'ETUDE ET DE MODELISATION DU MOUVEMENT DE PERSONNES.....	32
I. <i>MODELES QUALITATIFS DE REPRESENTATION DU MOUVEMENT DE PERSONNES</i>	34

1.1. Haute densité: les modèles de gravité.....	34
1.1.1. Le modèle de particules solides.....	34
1.1.2. Le modèle hydraulique.....	36
1.2. Faible densité: le modèle gazeux.....	36
II. TRAVAUX D'ETUDE ET D'OBSERVATION DES ASPECTS	
CINEMATIQUES DE L'EVACUATION.....	37
II.1. Constatations et hypothèses communes à toutes les études.....	37
II.2. Présentation synthétique des résultats d'observation.....	41
II.2.1. Circulations horizontales (couloirs).....	41
II.2.2. Passages de portes.....	44
II.2.3. Circulations verticales (escaliers).....	44
II.2.4. Rampes.....	47
II.3. Présentation détaillée des principaux travaux de recherche.....	48
II.3.1. Togawa (1955).....	48
II.3.2. Predtechenskii - Milinskii (1969).....	50
II.3.3. Galbreath (1969).....	59
II.3.4. Peschl (1971).....	60
II.3.5. Fruin (1971).....	61
II.3.6. Melinek & Booth (1975).....	64
II.3.7. Pauls (1974 - 1980).....	66
II.3.8. Kendik (1985).....	69
II.4. Les accidents de foule.....	69
II.5. Synthèse.....	71
III. LES MODELES ET CODES DE CALCUL EXISTANTS.....	72
Préambule à la présentation des modèles.....	72
III.1. Evacnet (1979-86).....	75
III.2. Blires (1979-82).....	79
III.3. Modèle de Berlin, Dutt & Gupta (1982).....	89
III.4. Ember (1982).....	90
III.5. Le Modèle de MacGregor Smith (1982).....	93
III.6. Le Potentiel d'évacuation (1982).....	95
III.7. ERM (Escape & Rescue Model) (1983-85).....	96
III.8. FEES/MB (1985).....	99
III.9. Takahashi - Tanaka (1987).....	104
III.10. Exit (1987-88).....	115
III.11. Exit89 (1991-?) et codes de calcul dérivés de Predtechenskii.....	121
III.12. Agora (1990-92).....	124
III.13. Evacsim (1993-?).....	129

<i>III.14. Synthèse sur les modèles existants</i>	137
---	-----

CHAPITRE 3: METHODOLOGIE ET ELEMENTS D'UNE DEMARCHE DE MODELISATION DU MOUVEMENT DE PERSONNES	138
I. AVANT-PROPOS	138
II. EXAMEN DES APPROCHES EXISTANTES PAR RAPPORT AU BUT RECHERCHE	140
III. DEMARCHE POUR L'ÉLABORATION DU MODELE	144
1. Observation des phénomènes	144
2. Délimitation du champ d'étude	146
3. Choix des données et informations nécessaires à la modélisation	148
4. Prémises d'un modèle	148
IV. PRESENTATION DU MODELE	150
CHAPITRE 4: SUPPORT GEOMETRIQUE A UN MODELE D'EVACUATION DANS UN ENVIRONNEMENT COMPLEXE ET ENCOMBRE	152
I. REPRESENTATION DE L'ENVIRONNEMENT	152
II. IDENTIFICATION DES CHEMINS D'EVACUATION DANS UN ENVIRONNEMENT COMPLEXE	154
<i>II.1. Graphe associé au maillage</i>	157
<i>II.2. Algorithme de Dijkstra</i>	161
<i>II.3. Introduction d'un second critère d'optimisation</i>	164
III. USAGE PRATIQUE DE L'ALGORITHME	167
<i>III.1. Aspects algorithmiques</i>	167
<i>III.2. Plans d'évacuation</i>	168
CHAPITRE 5: DEPLACEMENT DES OCCUPANTS	170
I. PREMIERS ELEMENTS D'UN SIMULATEUR	170
II. DEPLACEMENT A VITESSE CONSTANTE	171
<i>II.1. Détermination du but du déplacement</i>	172
<i>II.2. Détermination de la visibilité</i>	173
II.2.1. Cases non voisines	174
II.2.2. Cases voisines	175
<i>II.3. Déplacement de l'occupant</i>	176

III. DISCUSSION.....	177
<i>IV.1. Exemples</i>	<i>177</i>
<i>IV.2. Sensibilité au pas de temps</i>	<i>179</i>
CHAPITRE 6: DEPLACEMENT A VITESSE VARIABLE.....	182
I. MODE DE PRISE EN COMPTE DE LA DENSITE.....	182
II. ASPECTS NUMERIQUES DU CALCUL DE LA DENSITE.....	184
<i>II.1. Calcul du nombre d'occupants dans le rectangle de référence</i>	<i>184</i>
<i>II.2. Calcul de l'aire nette du rectangle de référence</i>	<i>185</i>
II.2.1. Approche par intégration numérique	186
II.2.2. Calcul analytique	187
II.2.3. Comparaison entre les deux modes de calcul	188
III. EXEMPLE DE SIMULATION	188
IV. MICRO-OPTIMISATION DU DEPLACEMENT	190
<i>IV.1. Pertinence du mouvement rectiligne en configuration d'occupation</i> <i>dense.....</i>	<i>190</i>
<i>IV.2. Principe de modélisation</i>	<i>191</i>
<i>IV.3. Aspects numériques du calcul des vitesses directionnelles</i>	<i>193</i>
<i>IV.4. Restrictions aux obstacles</i>	<i>194</i>
<i>IV.5. Aspects numériques de la recherche du pas optimal.....</i>	<i>195</i>
<i>IV.6. Exemples.....</i>	<i>198</i>
V. RAIDEUR.....	201
CHAPITRE 7: OPTIMISATION A L'AIDE D'UN CRITERE DE TEMPS.....	202
I. POINT SUR LE DEVELOPPEMENT DU MODELE	202
II. DISCUSSION.....	205
<i>II.1. Cas de la disproportion issues/occupation.....</i>	<i>206</i>
<i>II.2. Cas du virage</i>	<i>207</i>
III. DEFINITION DU PROBLEME ET SOLUTIONS ELABOREES.....	209
<i>III.1. Assimilation de l'arborescence à un couloir.....</i>	<i>211</i>
<i>III.2. Estimation par récurrence, à partir du temps nécessaire pour</i> <i>atteindre le noeud-père.....</i>	<i>213</i>
<i>III.3. Utilisation d'un critère quadratique</i>	<i>214</i>
<i>III.4. Récapitulatif</i>	<i>214</i>
IV. PRESENTATION D'EXEMPLES	216

IV.1. Etude de l'évacuation d'une grande salle sans obstacles internes.....	216
IV.1.1. Configuration 1.....	217
IV.1.2. Configuration 2.....	219
IV.1.3. Configurations 3 et 4.....	221
IV.1.4. Tableau récapitulatif.....	229
IV.2. Configuration "Piège".....	230
IV.3. Configuration avec issues et occupation disproportionnées.....	233
V. CONCLUSION.....	236
CHAPITRE 8: RESPECT DE LA DENSITE.....	237
I. INTRODUCTION.....	237
II. ENONCE DU PROBLEME.....	239
III. APPROCHES AVEC USAGE DE LA BIBLIOTHEQUE MATHEMATIQUE IMSL.....	240
IV. DEPLACEMENT SEQUENTIEL DES OCCUPANTS.....	242
IV.1. Classement des occupants.....	242
IV.2. Recherche de la solution optimale.....	243
IV.3. Résultats.....	243
IV.4. Introduction du contrôle global - Arches "numériques".....	244
V. SOLUTION RETENUE.....	246
CHAPITRE 9: CALIBRAGE, VALIDATION ET ETUDES DIVERSES.....	247
I. COMPARAISON AVEC LA METHODE RUSSE.....	247
I.1. Couloir sans changement de largeur.....	247
I.2. Couloir sans possibilité d'accélération.....	249
I.3. Couloir avec restriction de la largeur.....	250
I.4. Couloir avec augmentation de la largeur.....	252
I.4. Atténuation de l'accélération.....	252
I.5. Conclusion.....	254
II. DEBIT.....	254
III. EXEMPLE D'APPLICATION.....	254
IV. ASPECTS "CHAOTIQUES".....	257
V. SYNTHESE FINALE.....	259
CHAPITRE 10: ASPECTS INFORMATIQUES.....	261

I. PROGRAMMES ELABORES.....	261
<i>1.1. Programmes de saisie</i>	261
1.1.1. Saisie textuelle interactive	262
1.1.2. Saisie graphique	262
1.1.3. Convertisseur de fichier bitmap.....	263
<i>1.2. Simulateur</i>	263
<i>1.3. Visualisateurs graphiques</i>	266
<i>1.4. Utilitaires divers</i>	267
II. TEMPS DE CALCUL	268
III. AMELIORATIONS ALGORITHMIQUES ENVISAGEABLES	269
1. <i>Algorithme de Dijkstra</i>	269
2. <i>Calcul des surfaces</i>	269
3. <i>Optimisation des chemins avec un critère de "temps "</i>	270
4. <i>Résolution du système global</i>	270
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	271
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	1
ANNEXE 1 - EXEMPLE D'APPLICATION DE L'ALGORITHME DE DIJKSTRA.....	1
ANNEXE 2 - DISCUSSION SUR LES EFFETS INDUITS PAR LE CALCUL DE LA DENSITE PAR RAPPORT A LA SURFACE TOTALE DU LOCAL	8
ANNEXE 3 - CALCUL ANALYTIQUE DE LA SURFACE DU RECTANGLE D'INFLUENCE	12
ANNEXE 4 - INTERPOLATION D'ANGLE	15

PRESENTATION SOMMAIRE DU MEMOIRE DE THESE

MODELISATION DU MOUVEMENT DES PERSONNES LORS DE L'EVACUATION D'UN BATIMENT A LA SUITE D'UN SINISTRE

Ce travail a porté sur la mise au point d'un modèle et d'un logiciel de simulation du mouvement de personnes évacuant un bâtiment, lors d'un incendie ou d'une autre situation justifiant l'évacuation ou la provoquant spontanément. Un algorithme original a été développé, applicable à de fortes densités de personnes dans un milieu comprenant des obstacles au mouvement. Afin de pouvoir visualiser la simulation du mouvement, un post-processeur graphique a été réalisé, destiné à la représentation du bâtiment et de ses obstacles internes et à celle des trajectoires suivies par les personnes.

Un objectif général de sécurité incendie: mettre les personnes à l'abri des dangers

La préoccupation majeure vis-à-vis des dangers de l'incendie est de maintenir en vie les personnes impliquées dans un sinistre. La prévention, la protection active (détection, alarme, extinction), la protection passive (maintien de la stabilité des structures), les plans d'organisation du fonctionnement normal et la gestion de situation de crise dans les entreprises, se subordonnent à la réalisation de cet objectif. Si un sinistre a lieu, la mise à l'abri des personnes par déplacement de celles-ci, soit vers l'extérieur d'un bâtiment devenu dangereux, soit depuis des zones dangereuses vers des zones de refuge, doit donc être prévue à différents niveaux de la chaîne des mesures et actions de sécurité, et en particulier au niveau des dispositions constructives. Le problème de l'évacuation devient singulièrement "sensible" dès qu'un événement majeur indésirable concerne un Etablissement Recevant du Public (ERP), essentiellement en raison des densités d'occupation élevées que l'on peut rencontrer dans ce type de bâtiment. C'est la raison pour laquelle une réglementation spécifique est en vigueur, visant à assurer la protection des visiteurs

des ERP en imposant, entre autres, des exigences concernant la disposition et les dimensions des circulations d'évacuation (couloirs, escaliers). Les bases sur lesquelles ces dispositions ont été conçues ont beaucoup emprunté aux avis d'experts; des approches par le calcul à l'aide d'un modèle pourraient aider à la définition plus rationnelle de futures dispositions.

Les causes de l'évacuation

Le travail de modélisation a été conduit au sein d'une équipe du CSTB dont l'activité essentielle est la mise au point et l'utilisation de modèles et logiciels relatifs au feu et à l'incendie dans le bâtiment, ce qui nous a conduit à privilégier ce type de sinistre. Il faut rappeler que d'autres situations de danger, outre l'hypothèse de l'occurrence de l'incendie, peuvent imposer l'évacuation d'un bâtiment: séisme, fuite de gaz, alerte à la bombe,... Enfin, il existe de nombreux cas d'accidents de foule survenus en l'absence de danger manifeste - autre que la densité élevée d'occupation - notamment dans des stades mais également dans d'autres types d'établissements suite à des mouvements de panique sans cause apparente. Les principes du modèle réalisé sont applicables à toute évacuation de bâtiment relative aux hypothèses présentées ci-après.

Modéliser l'évacuation des personnes

La modélisation du mouvement de personnes peut aider à mieux définir de futures dispositions réglementaires ou des consignes: l'exploitation des avantages de la simulation sur ordinateur (analyse rapide de plusieurs scénarios, études de cas, études de sensibilité, visualisation des mouvements,...), permet en effet d'appréhender les problèmes survenant au cours d'une procédure d'évacuation, de mieux les comprendre, éventuellement d'en tirer des règles, ou bien même d'envisager des simulations en temps réel comme outils d'aide à la décision pour un meilleur déroulement de l'évacuation.

La réussite d'une procédure d'évacuation de bâtiment ne saurait être ramenée à un simple "dimensionnement" des circulations d'un bâtiment. Le déroulement satisfaisant d'une évacuation dépend en réalité de nombreux aspects, parmi lesquels on pense aux points suivants, de nature matérielle (équipements), organisationnelle (avant et pendant l'évacuation), ou comportementale (psychologie):

- précocité de la découverte du danger (la détection d'un feu par exemple),
- précocité de l'alarme, dimensionnement et protection des circulations d'évacuation, signalisation, localisation et répartition initiales des occupants;

- instant et mode d'expression de la décision de donner l'ordre d'évacuer, entraînement antérieur éventuel (exercices d'évacuation), connaissance des lieux, guidage actif de l'évacuation;

- solidarité et discipline des évacuants, état de santé et de mobilité des personnes (aptitude physique à se déplacer vite, ou, en milieu enfumé, en courbant la tête),... choix par les occupants de priorités d'action (alerte, sauvegarde des biens personnels, fuite...), effets du stress et de la peur, comportements régressifs,...

La complexité des phénomènes ne doit pas cependant masquer l'utilité d'une approche rationnelle de modélisation du mouvement des personnes, aussi imparfaite ou réductrice soit-elle. Le recours à un outil de simulation-prédiction, fondé sur une vue plutôt mécaniste des personnes (aux buts raisonnables, sans état d'âme) permet de définir des conditions nécessaires en vue de la prise de décisions susceptibles d'assurer un déroulement optimal de l'évacuation, qui peuvent ensuite être modulées par des considérations plus qualitatives (la psychologie du comportement) ou prenant en compte les spécificités d'un milieu et d'une activité du bâtiment donnés (des enfants, des personnes handicapées, des sportifs,...., ne se comporteront pas de la même manière).

Analyse des travaux antérieurs

Les travaux antérieurs que nous avons examinés n'ont pas réussi à traiter de façon globalement satisfaisante l'ensemble des aspects que nous venons d'évoquer. Cependant, de nombreux travaux d'observation des mouvements de foule ont été effectués depuis le début du siècle, notamment en (ex-)Union Soviétique, au Japon, aux Etats-Unis, en Grande Bretagne et au Canada. Ces travaux ont permis de dégager des lois empiriques corrélant notamment vitesse de déplacement et densité d'occupation, lesquelles lois ont parfois donné lieu à des règles de calcul simples permettant d'évaluer la capacité des voies de circulation dans le cas de configurations géométriques linéaires élémentaires. D'autre part, ces dix dernières années ont vu l'apparition de plusieurs modèles et codes de calcul permettant de simuler globalement l'évacuation d'un bâtiment, selon diverses hypothèses de travail propres à chacune des approches, et qui ne correspondaient pas exactement à l'orientation de l'étude que nous allons présenter.

Les objectifs du modèle réalisé

Pour notre part, nous avons décidé de porter notre intérêt sur un cas de figure insuffisamment traité: celui des Etablissements Recevant du Public, et plus particulièrement, des grandes salles de ces établissements (grands magasins,

cinémas, centres commerciaux,...), qui présentent, par rapport au cas - plus étudié dans les travaux antérieurs - des immeubles fortement compartimentés des particularités dont le modélisateur doit tenir compte:

- Ce type d'établissement est destiné, de par sa mission, à recevoir de fortes densités d'occupation. Ceci implique, lors de l'évacuation du bâtiment, d'importantes variations spatio-temporelles de la vitesse de déplacement, allant même jusqu'au bouchon localisé, auquel cas l'hypothèse de déplacement à vitesse constante retenue par la quasi-totalité des modèles existants ne peut être considérée comme valable.

- D'autre part, dans les immeubles fortement compartimentés (hôtels, par exemple), les chemins d'évacuation sont aisément identifiables, parfois uniques, et ne présentent en tout cas que peu d'alternatives. La taille réduite des locaux (chambre à coucher, par exemple) permet, en outre, de négliger le détail du mouvement des occupants à l'intérieur de ces locaux, et de ne retenir qu'une distance moyenne ou un temps moyen permettant d'atteindre la sortie du local. Cette simplification ne peut être retenue dans le cas des grandes salles.

- Nous avons voulu prendre en compte la présence d'obstacles solides (parois, objets) ou virtuels (des surfaces dangereuses, par exemple celle où le rayonnement thermique d'un feu interdit la présence).

L'approche effectuée vise ainsi principalement à l'atteinte de deux objectifs originaux:

- La modélisation du mouvement de personnes évoluant dans un environnement géométrique complexe (grande salle avec obstacles irréguliers par exemple),

- La reproduction des phénomènes de variation de vitesse et d'engorgement dus à la densité d'occupation.

Pour cela, nous avons choisi un mode de représentation du bâtiment, et mis au point un algorithme.

La représentation du bâtiment à évacuer

Alors que la plupart des modèles existants s'appuient sur une représentation préalable de l'espace géométrique de type réseau "nodal" (noeud=local, arc=passage), les deux objectifs présentés ci-dessus nous ont conduits à une modélisation géométrique radicalement différente: la description de l'environnement est basée sur une discrétisation spatiale de la surface au sol du bâtiment, du type "maillage", en mailles carrées de dimensions uniformes, dont le niveau de finesse est adapté à la taille et à la forme des obstacles. Ce maillage sert de trame pour représenter, outre les aires offertes au déplacement (l'ensemble des cases "vides"),

les murs et autres obstacles, qu'ils soient matériels ou qu'ils représentent des régions dangereuses (l'ensemble des cases "pleines").

La représentation des occupants

La surface au sol du bâtiment ayant été décrite sous la forme d'un ensemble de carrés élémentaires juxtaposés (cases "vides" et cases "pleines"), on représente la position d'un occupant à un instant donné par celle d'un disque: le centre du disque est repéré en coordonnées continues, le diamètre correspond à une hypothèse de surface au sol occupée par une personne (fonction de l'âge, de l'habillement,...). Une personne peut occuper n'importe quel point de l'espace continu dans la mesure où le disque la représentant n'empiète pas sur une case "pleine" (obstacle, surface interdite).

L'algorithme de simulation

L'adoption d'un tel mode de représentation de l'environnement, comme support au développement d'un modèle de mouvement de personnes, génère plusieurs problèmes algorithmiques relatifs au déplacement de chaque occupant. Deux questions sont essentielles:

- Comment définir le but du déplacement?
- Comment spécifier l'itinéraire qui doit être suivi par une personne se déplaçant d'un point à un autre de l'espace géométrique continu en réalité, et discrétisé dans la représentation, sachant qu'il existe des obstacles à contourner?

La modélisation du déplacement des occupants inclut d'autres sous-problèmes qui présentent des aspects communs à ceux rencontrés pour la mise au point d'algorithmes de navigation des robots, tels ceux concernant le contournement d'obstacles ou la visibilité des cibles.

Détermination du but du déplacement:

Parallèlement à la résolution de ces problèmes algorithmiques, une réflexion a dû être menée sur la nécessité de répartir les occupants en fonction de la configuration de l'occupation et de la dimension des issues, ou en d'autres termes, et plus généralement, sur la nécessité d'introduire un critère de temps (approximatif) au lieu d'un critère de distance dans la procédure d'identification des itinéraires d'évacuation. Cette introduction est apparue indispensable pour des configurations présentant d'importantes dissymétries d'occupation ou de dimensions des issues, ou bien si les itinéraires d'évacuation manifestent d'importants changements de direction localisés (tel un coude marqué).

Indépendamment du critère utilisé (temps ou distance), un algorithme de recherche de chemin optimal a ainsi été mis au point, dérivé d'algorithmes utilisés en recherche opérationnelle, et basé sur une transformation de la trame sous-jacente de l'environnement géométrique en réseau non-orienté. L'identification de ces itinéraires optimaux conduit à l'établissement d'une arborescence d'évacuation reliant les issues à toutes les cases du maillage sous-jacent. Cette arborescence ne constitue pas itinéraire strict pour l'occupant souhaitant se déplacer vers la sortie, mais simplement un fil conducteur: à chaque pas de temps l'occupant se dirige directement vers le point le plus éloigné de cette arborescence - en ce sens que la vision de ce point n'est pas occulté par des obstacles depuis la position actuelle - dans la direction de la sortie. En suivant ce fil, il peut ainsi de proche en proche atteindre la sortie, au gré des aléas et perturbations induits par les variations de densité d'occupation au cours de son cheminement (foule dense, bouchon,...), ces perturbations pouvant même l'amener à bifurquer vers une autre branche de l'arborescence menant à la sortie.

Variation de la vitesse en fonction de la densité des personnes:

La variation de la vitesse en fonction de la densité de la foule en mouvement est le phénomène majeur caractérisant le déplacement des personnes en configuration dense. Cette variation a été introduite dans le modèle par le biais d'une certaine entorse à la rigueur scientifique, qui semble pourtant justifiée au vu des résultats: les lois empiriques "vitesse-densité", qui ne sont théoriquement valables que pour des "paquets" d'occupants se déplaçant linéairement dans la même direction, ont été appliquées au niveau local du micro-environnement de chaque occupant. En l'occurrence, ce sont les lois empiriques établies par les Soviétiques Predtechenskii et Milinskii qui ont été exploitées. A chaque pas de temps et pour chaque occupant, est calculée une vitesse de déplacement, fonction de la direction de l'intention de déplacement de chaque personne et de la densité locale dans cette direction, cette densité étant calculée sur la base d'une zone de référence de taille réduite.

Déplacement des occupants:

Le but du déplacement et les vitesses "directionnelles" étant ainsi définis, un occupant est déplacé au cours d'un pas de temps de manière à ce qu'il se rapproche le plus de son but actuel (le point le plus éloigné encore visible de l'arborescence d'évacuation). Ce mouvement doit toutefois être compatible avec la contrainte de respect de la densité maximale d'occupation au sol, celle-ci étant introduite sous la forme d'une distance minimale entre occupants. La prise en compte conjointe de la vitesse directionnelle et de la contrainte de densité maximale engendre de légères perturbations du mouvement par rapport à une trajectoire rectiligne. Ces micro-

perturbations sont censées correspondre aux petits mouvements déviant de la ligne droite accomplis par une personne qui se déplace dans une zone à forte densité, et lui permettant d'éviter d'autres occupants comme de combler un "trou" devant elle pour progresser plus rapidement vers la sortie.

En définitive, le déplacement d'un occupant peut être schématisé sous la forme suivante:

- une "force d'attraction" attire l'occupant vers la sortie (point le plus éloigné du fil conducteur),
- cette attraction est biaisée par la présence d'une fonction locale de "possibilité de déplacement directionnel", qui définit en fait une région de points pouvant être atteints au cours du pas de temps actuel. Sera choisi le point de cette région se rapprochant le plus du but du déplacement.

Aspects informatiques

Les spécificités du sujet ont nécessité un investissement important en activités informatiques: programmation des algorithmes d'optimisation, utilisation de bibliothèques numériques et graphiques,...

Quatre programmes principaux ont été élaborés:

- Le programme interactif de saisie textuelle (sur station de travail Unix et sur PC);
- Le programme de saisie graphique (sur station seulement);
- Le simulateur (sur station et sur PC);
- Le visualisateur graphique (sur station et sur PC).

Ces programmes représentent plus de 12000 lignes de Fortran, dont 4000 pour le simulateur.

De nombreux efforts ont visé à réduire le plus possible le temps de calcul, qui dépend du pas de temps choisi, et, naturellement, des données de la simulation (nombre d'occupants, densité d'occupation, distances moyennes aux issues,...). A titre d'exemple, pour 50 occupants, 1 personne par m², une distance de 10 à 15 m jusqu'à la sortie, et un pas de temps d'une seconde, le temps de calcul sur une station de travail RISC est de 5 minutes, et sur un PC rapide, d'environ 15 minutes. Pour 500 occupants, 1 personne par m², 50 m en moyenne jusqu'à la sortie, et un pas de temps d'une seconde, le temps de calcul sur une station RISC est de 2 heures (et trois fois plus sur un PC).

Présentation graphique des simulations: le visualisateur

La mise à l'épreuve de l'algorithme nécessitait un moyen efficace de visualisation globale des résultats de la simulation, un visualisateur, que nous avons développé.

Le jugement de la pertinence apparente, et le dépistage d'erreurs lors de la phase de développement, ont été grandement facilités par la mise au point et l'utilisation de ce "post-processeur" graphique, qui permet d'animer sur l'écran de l'ordinateur des simulations d'évacuation du bâtiment. Dans la plupart des cas, les résultats observés sont vraisemblables en ce sens qu'ils sont conformes à l'intuition. L'utilisation du post-processeur graphique a rendu possible la mise en évidence des phénomènes inhérents au mouvement de foule décrits dans les essais d'évacuation cités dans la bibliographie: accumulation en amont des restrictions à l'écoulement d'évacuation, pouvant conduire jusqu'à l'immobilisation temporaire, détente et augmentation de la vitesse après franchissement de la restriction,...

Validation

Outre la confrontation à des expériences en vraie grandeur, qui nécessiterait une véritable étude complémentaire et impliquerait des moyens non négligeables, les seules tentatives de validation du modèle qui peuvent être entreprises concernent la comparaison de résultats de calcul portant sur des configurations linéaires simples à densité uniforme (couloir par exemple), à ceux obtenus à l'aide de la méthode manuelle mise au point par Predtechenskii et Milinskii. Dans les cas examinés, les résultats du modèle recoupent assez bien ceux calculés manuellement. Pour d'autres cas de figure, seul un jugement qualitatif (un avis d'expert) peut à ce stade être porté sur la pertinence du résultat des applications.

Eléments pour une poursuite

Le développement et la mise au point du modèle pourraient être poursuivis selon les axes suivants:

- réflexion pour l'amélioration des solutions numériques de minimalisation du système d'équations avec contraintes,
- essais en vraie grandeur pour le calibrage et la validation définitive du modèle,
- aménagements informatiques divers (rajout de la prise en compte d'escaliers, de points de passage obligatoires, diversification des caractéristiques des occupants en matière de vitesse de déplacement, de dimensions,...)

Une phase ultime de développement devrait être consacrée à la conceptualisation puis à la réalisation de couplages entre ce modèle d'évacuation et divers modèles physiques ou probabilistes déjà existants (enfumage, tenabilité,...).

I N T R O D U C T I O N

Dans le langage des spécialistes et des acteurs confrontés d'une manière ou d'une autre à des problèmes de sécurité incendie, la question de la mise en sécurité d'un local ou d'un bâtiment, s'exprime très souvent à travers l'usage de la terminologie normative: "coupe-feu", "canton", "pare-flamme ½ heure", "dégagement", "compartiment", "circulation", "unité de passage"... L'emploi de ces expressions techniques "pour initiés" ne saurait cacher la préoccupation sous-jacente à toutes les démarches, qu'elles soient scientifiques ou bien réglementaires, développées ces dernières décennies afin de maîtriser l'incendie et ses conséquences, à savoir: la protection de la vie humaine. Cette préoccupation reste toujours d'actualité, et ce malgré l'attention accrue portée au problème de la sûreté et sécurité des biens et équipements industriels, notamment à cause de la valeur considérable des investissements technologiques modernes, mais également dans un souci de minimiser les retombées néfastes d'un accident industriel sur l'environnement et sur l'homme. D'ailleurs, les événements nous le rappellent malheureusement trop fréquemment: ce que notre société considère comme intolérable, c'est bel et bien l'atteinte à la vie humaine.

Les incendies sont à l'origine de 17000 décès par an au monde¹, avec une disparité singulièrement importante d'un pays à l'autre en nombre de décès par an et pour 100.000 habitants: de 0,6 pour l'Italie et les Pays-Bas, à 10 décès pour la République Arabe Unie, en passant par 1,2 décès pour la France (~600 morts par an) et 2,8 pour les Etats-Unis². Ce taux ne présente pas de corrélation, ni dans un sens ni dans

¹ [BERL 82]

² A cette occasion, ouvrons une parenthèse pour rappeler à quel point les problèmes relatifs à la sécurité des personnes ne peuvent se résumer à de froides expressions quantifiées, et sont au contraire assujettis à la perception qui en est faite de la part de l'opinion publique et de la société plus généralement. Citons un exemple classique, que rappelait M.Guyonnet dans son cours [GUYONNET]. Il est question du problème de la quantification du *risque*, en tant que fonction de la *fréquence* et de la *gravité* de l'événement indésiré:

"Que répondez-vous si vous avez à choisir entre deux événements définis comme suit:

$$\text{Evénement 1} \begin{cases} \text{fréquence } f_1 = 1 \text{ fois / an} \\ \text{gravité } g_1 = 1 \text{ mort / fois} \end{cases} \quad \text{Evénement 2} \begin{cases} \text{fréquence } f_2 = 1 \text{ fois / 100 ans} \\ \text{gravité } g_2 = 100 \text{ morts / fois} \end{cases}$$

Il est clair qu'après 100 ans nous avons le même nombre de morts. Or, l'événement 1 est perçu comme un risque de la vie quotidienne, et l'événement 2 comme une Catastrophe."

l'autre, avec le Produit National Brut, ni, paradoxalement, avec le nombre de fumeurs (Italie par exemple), bien que la cigarette soit fréquemment incriminée comme étant à l'origine des incendies.

Un petit feu de bâtiment s'éteint tout seul, est éteint, ou bien se développe au point de menacer les personnes se trouvant à proximité. Dans une telle éventualité, trois grandes catégories d'actions peuvent être envisagées pour la protection des vies humaines vis-à-vis de l'incendie:

- des mesures visant à assurer une *évacuation rapide*,
- des mesures de *protection sur place* des occupants demeurant dans le bâtiment,
- le *sauvetage* des personnes en danger par intervention externe.

Ce travail de thèse est rattaché à la première de ces catégories d'actions.

Rappelons à l'occasion que des situations de danger autres que l'incendie peuvent imposer l'évacuation d'un bâtiment (séisme, fuite de gaz, alerte à la bombe,...), et signalons qu'en réalité, la présence d'une concentration importante de population constitue déjà un facteur potentiel de danger en soi, comme en témoignent les multiples accidents de foule survenus sans raison apparente. Les forces que peuvent se développer par des amas de personnes dans de tels circonstances sont tout à fait surprenantes, pouvant même provoquer la torsion d'éléments de protection métalliques³.

L'incendie est un phénomène dynamique par excellence. L'étude de sinistres importants met en évidence la criticité du facteur *temps*, notamment si ce facteur est examiné par rapport à la possibilité d'évacuer: tout se décide en quelques minutes. Les rescapés de l'incendie du Beverly Hills Supper Club (1977, 165 morts) s'accordent ainsi pour affirmer qu'une ou deux minutes de plus auraient suffi pour que la salle soit évacuée et qu'on n'ait pas à déplorer de victimes⁴.

Cette dynamique confère par conséquent, une sensibilité accrue du problème de l'évacuation à la variable *temps*. Toutes les démarches de sécurité incendie se réfèrent obligatoirement à cette grandeur.

³ [PAULS 88]

⁴ [SWARTZ 79]

Le problème de la sécurité des personnes confrontées à l'incendie a souvent été schématisé à l'aide de deux variables de temps théoriques caractéristiques, destinées à être comparées:

- le temps *disponible* pour évacuer en conditions de sécurité (*Available Safe Egress Time - ASET*), et
- le temps *nécessaire* pour évacuer en conditions de sécurité (*Required Safe Egress Time - RSET*).

Tous les efforts convergeront vers une augmentation de la valeur de la première grandeur et/ou une diminution de celle de la seconde. Les approches et démarches sont multiples et très variées: depuis les considérations et décisions de bon sens susceptibles d'entraîner une variation favorable de la valeur de ces grandeurs, aux règles complexes préconisées par la réglementation (qui sont souvent le fruit d'une synthèse entre des travaux de recherche et des règles empiriques éprouvées), pour finir par les approches scientifiques récentes visant, à travers la modélisation, à étudier et maîtriser l'évolution dynamique des phénomènes.

Ces dernières approches, utilisées à des fins explicatives (a posteriori) ou prédictives (a priori), ont connu un essor très important ces dernières années, notamment dans le domaine de la modélisation physique du feu. La modélisation de l'évacuation des personnes a suscité moins d'efforts et d'initiatives, et ce pour diverses raisons, parmi lesquelles figure certainement le fait que le problème de la modélisation physique du feu, loin d'être globalement moins complexe, présente néanmoins le mérite de paraître plus "physique" et mieux posé que celui de l'évacuation d'un bâtiment suite à un incendie. Il est en effet difficile de traiter de ce sujet sans se référer abondamment à de multiples aspects échappant au domaine classique du "calcul scientifique": il est notamment impossible d'ignorer totalement les problèmes d'organisation relatifs à une procédure d'évacuation, ou encore les facteurs psychologiques conditionnant le comportement humain en condition d'urgence. Cette complexité semble d'ailleurs être en fait l'apanage de tous les aspects de cette nouvelle discipline qu'est l'approche scientifique de la sécurité incendie; les questions posées par cette "science" exigent, en toute rigueur, de faire appel aux connaissances dans des domaines aussi variés que les transferts de masse et de chaleur, la technologie des matériaux, l'architecture, les mathématiques appliquées, la psychologie, les méthodes numériques, la toxicologie, la sécurité des systèmes, etc..

Ainsi, si l'on dispose à l'heure actuelle d'outils informatiques permettant de calculer de manière relativement satisfaisante, selon divers scénarios d'incendie, les évolutions

de grandeurs physiques caractéristiques de l'état de zones données d'un bâtiment (hauteur libre sous fumées, taux de CO₂, éclairement reçu par une surface,...), des lacunes subsistent quant aux moyens permettant de prédire, de manière relativement fiable, si en un *lieu* et un *instant* donnés, il y a ou non présence humaine, ce qui prive finalement de la possibilité d'évaluer l'incidence des grandeurs physiques calculées sur l'évolution de la sécurité des occupants éventuels.

Ce travail de thèse se propose d'apporter une contribution nouvelle dans le domaine de l'étude des problèmes relatifs à l'évacuation, notamment par la proposition d'un modèle de déplacement permettant de simuler l'évacuation d'une population à haute densité depuis un site de géométrie complexe pouvant comporter des obstacles à la circulation (grandes salles, Etablissements Recevant du Public,...). Ce choix est dicté par plusieurs considérations:

1. La "sensibilité" du sujet, à la fois à cause du risque potentiel lié simplement au nombre élevé de personnes, mais aussi, et de manière concomitante, à cause de l'exigence accrue de sûreté de la part de la société dans ce type d'établissements.
2. Il s'agit d'un des aspects les moins bien traités dans les approches d'étude du mouvement de personnes par le calcul existantes, notamment à cause de certaines spécificités inhérentes à la complexité des configurations géométriques et à la présence de foule à haute densité.

L'élaboration de ce projet a été marquée par les étapes principales suivantes:

1. Analyse critique de la bibliographie existante. Cette phase très importante du travail est venue répondre à trois questions et préoccupations majeures:
 - a. Quelle est l'importance des facteurs d'ordre psychologique et plus généralement sociologique dans le comportement d'évacuation des individus?
 - b. Quelles sont les données d'observations sur le mouvement de personnes et l'évacuation des bâtiments?
 - c. Quel est l'état de développement actuel des approches du problème de l'évacuation par modélisation du mouvement de personnes? Quelles sont éventuellement les insuffisances par rapport au but que s'est fixé ce travail de thèse?
2. Délimitation précise des objectifs de ce projet: configurations concernées, hypothèses de travail et données retenues.
3. Définition d'un mode de représentation de l'environnement géométrique qui servira de support au développement du modèle.

4. Détermination des itinéraires de déplacement des évacués en environnement complexe avec obstacles.
5. Prise en compte des phénomènes liés à la présence de foule dense: variation de la vitesse de déplacement des occupants en fonction de la densité, densité maximale,...
6. Répartition des flux d'évacuation d'occupants avec un critère autre que celui de la distance la plus courte.
7. Calibrage et validation du modèle.

Organisation du mémoire

Ce mémoire est organisé en deux parties principales.

La première est composée des chapitres 1 et 2 et est consacrée à une présentation sommaire du sujet ainsi que de l'état des connaissances ayant trait à l'évacuation. Plus particulièrement, au premier chapitre nous présentons une synthèse bibliographique sur les aspects du problème de l'évacuation dépendant fortement de considérations d'ordre psychologique ou sociologique: comportement humain face au danger, aspects organisationnels de l'évacuation, environnement architectural, ... Le deuxième chapitre est consacré aux travaux existants sur le mouvement de personnes et l'aspect "cinématique" de l'évacuation. Ce thème général recouvre des sujets variés, allant de la simple observation du mouvement de foule, aux approches de calcul informatisées complexes, en passant par les méthodes de calcul empiriques ou semi-empiriques.

Basés sur les conclusions et constatations suscitées au cours de l'étude de la bibliographie, nous présentons, au chapitre 3, sous une forme abstraite les éléments généraux de raisonnement et de méthodologie qui ont servi à l'élaboration du modèle finalement proposé. Le modèle est présenté à partir du quatrième chapitre, en faisant apparaître de manière progressive les degrés successifs de complexification qui y ont été introduits.

Ce document consacre une part particulièrement importante - pour un mémoire de thèse - à la présentation de la bibliographie. Plusieurs raisons rendent compte de ce choix:

1. Quand une thèse est entamée, il convient de ne pas refaire un travail concernant des aspects qui ont déjà été traités dans la bibliographie. Il est par conséquent nécessaire de justifier le travail fourni en essayant de faire

apparaître les similitudes et différences avec les approches antérieures. Or, malgré le caractère apparemment "marginal" du sujet, celui-ci a donné lieu ces quinze dernières années à une littérature abondante.

2. Une présentation détaillée de la bibliographie permet de fournir un document utile pour toute personne souhaitant s'informer ou se documenter sur le sujet traité.

C H A P I T R E 1

L ' H O M M E E N P R E S E N C E D E L ' I N C E N D I E D E B A T I M E N T

Le problème de l'évacuation des bâtiments est étudié depuis déjà plusieurs décennies. L'avènement de la société moderne s'est accompagné du développement de grandes métropoles et de l'érection de bâtiments abritant des concentrations de plus en plus élevées de personnes. De nombreux incendies dévastateurs au cours du siècle dernier, notamment dans des salles de spectacles, attirèrent l'attention sur le problème de l'évacuation des immeubles. Il apparut rapidement que l'examen des aspects purement techniques du problème de l'évacuation des bâtiments ne saurait être dissocié de celui de plusieurs aspects comportementaux induits par des facteurs d'ordre psychologique, social ou culturel au sens large.

La nécessité d'évacuer, pour une raison ou une autre, de tels immeubles fit émerger, par exemple, un phénomène psychologique concomitant à l'évacuation: la célèbre "panique", écueil souvent évoqué pour les problèmes d'évacuation impliquant un nombre élevé de personnes, et a fortiori lorsque le stress constitue un excitateur. En 1849, dans un théâtre de Glasgow, un spectateur fumant la pipe jette au sol un papier enflammé; quelqu'un crie "Au feu!" et 65 personnes périssent dans la panique qui s'ensuit⁵. En 1878, au Coliseum Theatre de Liverpool, un spectateur quitte brusquement la salle en courant vers la sortie durant la représentation; toute l'assistance tente de l'imiter dans un désordre total provoquant 37 décès. A Athènes, en 1981 à la sortie d'un match de football, 21 personnes meurent piétinées dans les escaliers situés sous les gradins du stade, à la suite d'un mouvement de panique sans raison apparente. Aucun danger réel ne pouvant expliquer de tels comportements, seuls des faits à première vue ordinaires et bénins semblent être à l'origine du sinistre: une très forte compression de la foule s'amassant vers la sortie, la chute d'une personne dans les escaliers, l'irritation de la foule et son impatience de quitter le stade.

⁵ [PREDECHENSKI 78]

La panique est un phénomène, certes complexe, mais relativement bien commenté dans les études des psychologues, notamment dans les travaux concernant le comportement des foules, l'instinct grégaire, etc. D'ailleurs, certains facteurs concourant à l'apparition des phénomènes de panique, et également observés en conditions d'évacuation d'urgence, constituent, à eux seuls, des thèmes classiques en psychologie: claustrophobie, agoraphobie, vertige (dans le cas particulier de l'évacuation des tours),...

Le problème de la panique (repris au paragraphe 1.1.) n'est pas le seul aspect de l'évacuation où des considérations d'ordre psychologique viennent compliquer le travail de modélisation. Bien au contraire, il existe de nombreux autres aspects psychologiques, comportementaux et plus généralement "sociologiques" qui contrarient de manière significative un tel travail. Citons dans un ordre arbitraire certains de ces paramètres:

- la connaissance préalable de la géométrie du bâtiment,
- la reconnaissance du chemin à suivre dans un environnement peu familier (ce que les anglo-saxons appellent "way-finding"),
- la tendance des occupants non familiarisés avec les lieux à suivre d'autres personnes semblant plus sûres de leur itinéraire ("instinct grégaire"),
- Le phénomène d'émergence de "leaders" en situation de crise,
- les relations sociales préalablement établies et le degré d'affiliation entre les personnes qui évacuent (parents, amis, collègues de travail, visiteurs anonymes d'Etablissements Recevant du Public...),
- les relations hiérarchiques pouvant éventuellement exister dans la population à évacuer (hôpitaux, armée,...),
- l'esprit de groupe, la solidarité, l'altruisme ou au contraire le comportement égoïste dont peut faire preuve la foule,
- l'âge et la mobilité des occupants, la présence ou non d'enfants, ou de personnes nécessitant une assistance afin d'évacuer,
- leur préparation spécifique (exercices d'évacuation),
- les effets psychologiques induits par des facteurs de stress comme la fumée ou la sensation de chaleur reçue,
- l'influence de ces derniers éléments (fumée, chaleur) sur le choix de l'itinéraire d'évacuation,
- la discipline dont fait preuve la foule et le respect des instructions d'évacuation,
- etc..

D'autres aspects du couplage mouvement de personnes-incendie relèvent du domaine de la physiologie et de la toxicologie:

- quels niveaux d'éclairement, de température et d'humidité l'homme est-il en mesure d'endurer, et sur quelle durée?
- quel est l'effet de telle concentration d'un produit de combustion toxique, et quelle est l'influence de la durée d'exposition à ce produit; quel est l'effet combiné de l'exposition à plusieurs produits toxiques ?
- quelle est, en définitive, l'incidence de toutes ces sollicitations sur les décisions de déplacement d'un occupant et la célérité de ce déplacement ?

La multiplicité des aspects à envisager illustre de manière assez éloquente la complexité du problème.

Dans la suite de ce chapitre, nous nous contentons de présenter de manière sommaire le rôle que peuvent jouer certains de ces paramètres, ceux qui paraissent les plus prépondérants dans le déroulement d'un processus d'évacuation suite à la déclaration d'un incendie.

I. ASPECTS PSYCHOSOCIOLOGIQUES RELATIFS A L'EVACUATION

La première partie de ce chapitre est consacrée à une brève présentation de divers aspects afférents à la psychologie et plus généralement au comportement humain, susceptibles de jouer un rôle plus ou moins important dans le déroulement d'une évacuation. Chacun de ces sujets ayant fait l'objet d'ouvrages entiers, ces quelques lignes ne sont présentées que dans le souci de situer les aspects techniques dont traite principalement ce mémoire dans leur contexte global réel.

Ces aspects ont été regroupés en grandes catégories. Le découpage réalisé n'est certainement pas parfait, étant donné l'interdépendance de plusieurs thèmes.

1.1. La panique

Le mot «*panique*» est un terme qui revient comme un leitmotiv dès qu'il est sujet de l'homme confronté à l'incendie. Les spécialistes ne sont cependant pas d'accord avec cette association d'idées apparemment évidente.

Plusieurs définitions complémentaires de la notion de *panique* ont été proposées⁶:

- *"Réponse irrationnelle et inadaptée aux stimuli, et par-delà inefficace"*
- *"Comportement égocentrique en situation de danger tendant à assurer un gain personnel, même si cela doit se produire au détriment des autres personnes"*

Divers facteurs contribuent à susciter un tel comportement: le sentiment d'abandon, en particulier pour des personnes isolées; la frustration et l'anxiété générées par une suite de tentatives avortées d'évacuation ou de combat contre le feu; la perception d'être pris au piège, particulièrement quand les occupants se croient impuissants ou ont le sentiment de manquer de temps pour trouver et/ou emprunter les voies d'évacuation, vis-à-vis de la vitesse de croissance d'une menace grandissante. Ce processus s'auto-alimente, puisque quand la panique survient, les personnes ont tendance à sous-estimer le temps disponible, etc.

⁶ [CROSSON 1982]

Le terrain objectivement favorable au développement de tels sentiments ou impressions est constitué d'éléments et événements qui, s'ils étaient tous réunis, composeraient un scénario-catastrophe typique:

- *absence d'alarme,*
- *développement rapide du feu,*
- *mauvaise tenue de la structure du bâtiment,*
- *enfumage rapide,*
- *mauvais écoulement des flux d'évacuation,*
- *éclairage insuffisant,*
- *absence d'instructions pour l'évacuation,*
- *signalisation défectueuse,*
- *blocage de voies de circulation à cause du développement du feu,...*

Malgré les idées reçues assez tenaces sur le sujet, tous les auteurs s'accordent pour affirmer que la panique est un phénomène rare⁷, et pour déplorer que les comportements sociaux et altruistes, si souvent observés en cas d'incendie, soient complètement occultés, à la fois en raison de prédispositions de la psychologie humaine (on ne parle pas des trains qui arrivent à l'heure), mais aussi à cause des déformations de représentation de la réalité des sinistres induites de la part des média, ceux-ci ayant tendance à privilégier la thèse de l'événement sensationnel négatif.

Il semblerait d'autre part que le risque de panique généralisée soit autant, sinon plus, corrélé à la présence de foules importantes à haute densité qu'à la manifestation d'un incendie: il existe dans la bibliographie plus de récits de phénomènes de panique généralisée sans incendie, qu'avec incendie. Des études psychologiques expérimentales tendraient à confirmer que, chez les hommes, l'immersion dans un environnement densément occupé constitue en soi un facteur de stress (la tendance serait inverse pour les femmes)⁸. Ce phénomène est d'ailleurs probablement encore plus complexe, puisqu'un effet décorrélé des cofacteurs *nombre d'occupants* et *surface* n'est pas à exclure (2 locaux à densité égale mais de dimensions différentes ne sont pas équivalents). Ceci tendrait à confirmer le fait que la concentration d'un nombre élevé de personnes sur une aire réduite constitue en soi un facteur potentiel de sensation de danger.

⁷ [PAULS 88], [CANTER 80], [BRYAN 1977], [KEATING 1987], [SWARTZ 79], [ZELTZER 85], [LEVIN 84]

⁸ [MACKINTOSH 75]

Il semblerait que, dans une certaine mesure, la présence d'un incendie ait, au contraire, tendance à favoriser dans un premier temps le développement de comportements sociaux dans le cas où une population importante est impliquée: organisation spontanée de l'évacuation, émergence de "leaders", entraide pour le déplacement, sauvetage de personnes en danger, formation de "locaux de rassemblement" (33 personnes dans une seule chambre lors de l'incendie du MGM Grand Hotel de Las Vegas en 1980⁹). Il est remarquable que dans un incendie aussi meurtrier que celui du Beverly Hills Supper Club dans le Kentucky (165 morts, 1977), les quelque mille personnes se trouvant dans la salle menacée semblent avoir gardé leur sang-froid jusqu'au dernier instant, où elles ont été littéralement happées par les flammes. Cette attitude n'est certainement pas généralisable, et il est indispensable à cet égard de rappeler ce que tous les auteurs affirment: chaque incendie constitue une histoire en soi, composée d'une suite d'événements originale¹⁰. Comment, par exemple, négliger l'influence sur le déroulement de l'évacuation du fait que les personnes impliquées dans l'incendie susmentionné étaient des habitués du club, ayant confiance en la direction et le personnel, et attendant dans la jovialité le début d'une représentation?

En cas d'incendie grave, il est plus fréquent que des épisodes de comportement régressif, irrationnel et de panique se manifestent chez des individus isolés et coupés de toute communication. Mais encore une fois, les spécialistes incitent à la prudence, en mettant en garde contre le risque d'interpréter a posteriori un comportement comme étant irrationnel alors que, souvent, il constitue une des rares réponses possibles aux stimuli menaçants, notamment si l'on tient compte du champ d'action restreint de la personne, de la pauvreté et de l'ambiguïté de l'information qu'elle détient à ce moment précis, et du court laps de temps dont elle dispose pour construire une réponse et la mettre en oeuvre.

Il est primordial de se rendre compte que l'incendie est un danger qui induit souvent des comportements hautement sociables: ce que les individus ont le plus en horreur c'est de se retrouver seuls dans leur entreprise d'évacuation, et plus généralement pour affronter la situation dangereuse. Quand des phénomènes de panique apparaissent, ceci ne doit pas systématiquement et exclusivement être attribué à une prédisposition agressive, asociale et irrationnelle; c'est souvent parce que les conditions sont ou semblent véritablement très dangereuses. Levin¹¹ souligne qu'il est

⁹ [BRYAN 82a]

¹⁰ [LERUP 82], [CANTER 85]

¹¹ "*Human Behavior in Fire: What we know now?*" [Levin 84]

important de comprendre que les décisions et actions des individus suivent des modèles de comportement cohérents, et qu'il incombe par conséquent aux acteurs de la sécurité de tenir compte de ces schémas de comportement (par exemple: les occupants ont tendance à évacuer en empruntant les itinéraires familiers), et d'oeuvrer de sorte que l'évolution de l'environnement physique au cours d'un incendie contribue le moins possible à susciter des réactions de panique (dimensionnement et positions des issues, désenfumage,...). La manière dont Levin décrit les conditions d'apparition de phénomènes de panique peut être schématisée à l'aide de l'arbre de défaillance de la figure 1.

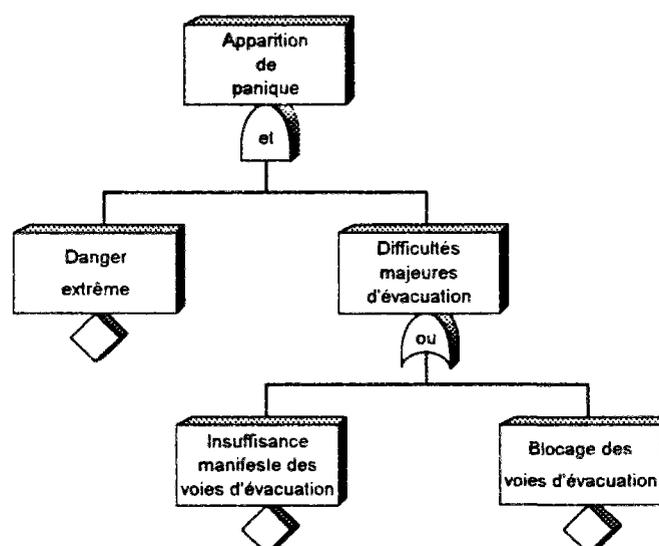


Fig. 1 - Arbre de défaillance d'après la description des conditions d'apparition de phénomènes de panique de Levin.

L'auteur en conclut que le rôle des concepteurs est d'éviter que ces conditions soient réunies.

1.2. Perception de l'environnement

La perception de l'environnement est assurément un paramètre fondamental du comportement humain en situation d'incendie, compte tenu de la variété et de l'intensité des stimuli sensoriels auxquels doit répondre la personne impliquée:

- détection du feu (sensations olfactive, auditive, visuelle)
- réponse aux signaux d'alarme
- perception des informations visuelles et éventuellement auditives relatives à l'évacuation.

L'évacuation rapide d'un bâtiment suppose la perception précoce du danger, et la reconnaissance des éléments permettant de trouver très rapidement le chemin menant vers une zone-refuge.

La première des dispositions visant à faciliter l'évacuation rapide concerne les dispositifs d'alerte sonore en cas d'incendie. A cet égard, des travaux intéressants ont été menés sur la capacité de réveil des alarmes sonores; citons notamment ceux de Nober¹² et Kahn¹³. Tous deux soulignent l'importance du niveau sonore de l'alarme vis-à-vis du bruit de fond: Kahn préconise une émergence de 10 dbA de l'alarme par rapport au bruit de fond au niveau de l'oreiller, tandis que Nober a démontré que 20% des sujets ne sont pas réveillés par une alarme de 55 dbA au niveau de l'oreiller, si un conditionneur d'air fonctionne simultanément dans la chambre. Il est à noter que ces conclusions semblent en adéquation avec le *gestaltisme*, qui constitue le modèle psychologique de perception le plus usité -également pour les aspects de perception en sécurité incendie-, et selon lequel les stimuli sont perçus en fonction de leur "*fond*", en formant un tout indissociable appelé *forme*: un son est d'autant mieux perçu qu'il émerge et diffère du bruit ambiant; un signal visuel contrastant avec le fond retient mieux l'attention.

Même si l'alarme est perçue, il convient de relativiser l'efficacité de ces systèmes sonores, ceux-ci étant souvent considérés peu crédibles aux yeux des personnes, et par conséquent souvent ignorés¹⁴. Il a été observé de nombreuses fois que la perception seule d'un signal d'évacuation ne suffit pas à convaincre les occupants à évacuer: ceux-ci se montrent méfiants vis-à-vis de l'alarme et/ou recherchent une information ou un indice complémentaire permettant de valider le signal d'évacuation. Ainsi J.Pauls¹⁵ affirme avoir mené des exercices d'évacuation en déclenchant l'alarme, sans prévenir les occupants de l'immeuble du déroulement d'un exercice, et avoir observé que de nombreuses personnes restaient sur place, pensant qu'il s'agissait d'une alarme intempestive ou d'un exercice.

Au contraire, un indice révélant de manière indubitable la présence d'un problème pouvant être interprété comme un incendie suffit souvent à déclencher un mouvement d'évacuation: la fumée en provenance d'un petit feu rapidement éteint, a provoqué

¹² "Waking Effectiveness of Household Smoke and Fire Detection Devices" [NOBER 81]

¹³ "Human Awakening and Subsequent Identification of Fire-Related Cues" [KAHN 84]

¹⁴ [CANTER 85]

¹⁵ "Calculating Evacuation Times for Tall Buildings" [PAULS 87]

l'évacuation spontanée des niveaux 9 à 22 du World Trade Center de New-York, malgré les messages sonores enjoignant les occupants à rester sur place¹⁶.

La phase d'évacuation qui suit l'étape de prise de connaissance du feu met elle aussi à l'épreuve les facultés sensorielles des personnes: reconnaissance des lieux, reconnaissance des éléments architecturaux, identification et déchiffrement de la signalisation d'évacuation,...

C'est ainsi que, toujours dans un souci de faire émerger les éléments importants par rapport à l'environnement, il est préconisé d'éviter les miroirs le long des chemins d'évacuation, de matérialiser les parois vitrées à l'aide de bandes, d'afficher des inscriptions informant qu'une porte ne donne pas sur une issue, et avant tout, d'assurer un éclairage minimal en cas d'incendie.

Le problème de la signalétique, inévitablement lié à celui de la visibilité, a lui aussi fait l'objet d'études poussées, notamment au CSTB par A.-M.Majou¹⁷, pour ce qui concerne l'aspect, la couleur, la forme, et l'éclairage des signaux d'évacuation, aussi bien en conditions normales qu'en milieu enfumé, l'un des problèmes majeurs de la signalisation d'évacuation étant, en effet, la faible visibilité dans la fumée des signaux placés près des plafonds; un autre emplacement, plus bas, risquerait de les rendre invisibles dès que la densité d'occupation devient relativement importante. Ces dernières années, des expériences de balisage des chemins d'évacuation ont été tentées, en utilisant des matériaux photoluminescents au sol et sur les parois latérales.

Les facultés auditives n'étant que faiblement affectées dans un environnement d'incendie, il est logique de s'interroger sur la possibilité de guidage sonore des occupants au cours de l'évacuation d'un bâtiment. A ce sujet, il est intéressant de décrire les expériences menées par Y.Watanabe¹⁸. Il a été demandé à des personnes placées dans une grande salle, et dont les yeux étaient bandés, de se diriger vers un haut-parleur émettant un message du type: "La sortie est par ici". L'expérience s'est révélée un succès total dans le cas où aucun obstacle ne séparait l'individu de la source sonore [Fig. 2].

¹⁶ [CROSSON 1982]

¹⁷ "Visibilité à travers la fumée" [MAJOU 79a], "Application à la signalisation-incendie de données expérimentales de visibilité à travers la fumée" [MAJOU 79a]

¹⁸ "A Study on Sound Guidance for Evacuation" [WATANABE 82]

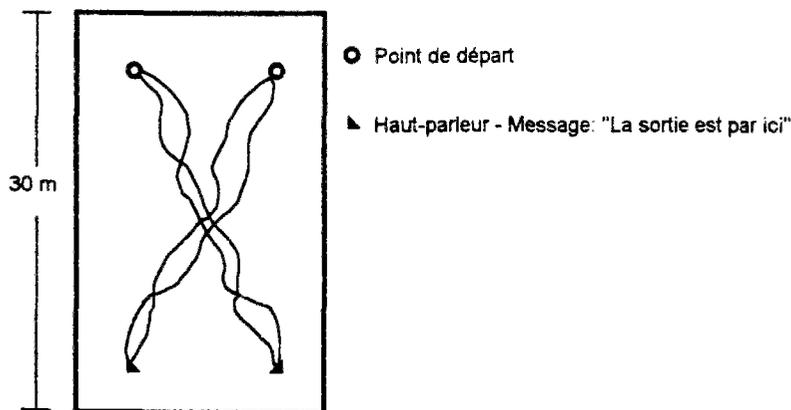


Fig. 2 - Principe de l'expérience de Watanabe: une personne se dirige les yeux bandés vers le haut-parleur (un seul haut parleur fonctionne lors de chaque expérimentation). Les tracés correspondent à une superposition de résultats de plusieurs essais.

Dans le cas de présence d'obstacles, les cheminements obtenus par guidage sonore sont plus hésitants, mais l'expérience se révèle également réussie [Fig. 3].

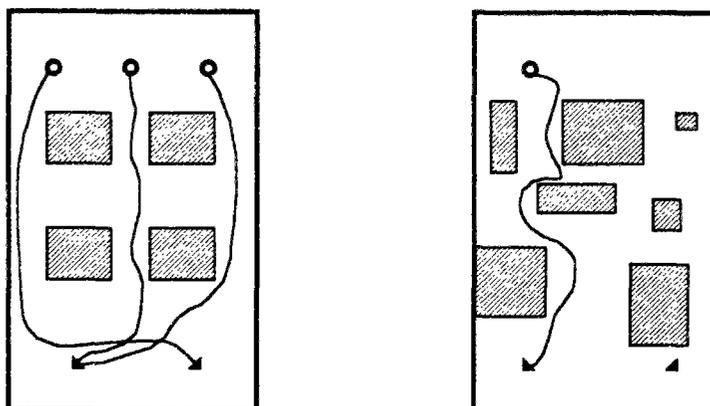


Fig. 3 - Exemples de cheminements au cours des expériences de Watanabe avec présence d'obstacles réguliers et irréguliers.

Il serait pourtant erroné de généraliser la portée de ces résultats d'expériences, la mise en oeuvre pratique d'un guidage sonore pouvant se révéler très délicate et ce pour les raisons suivantes:

- Un guidage sonore ne peut se concevoir que comme complémentaire, le guidage visuel au moyen de la signalisation d'évacuation étant beaucoup plus efficace tant que l'enfumage de la salle demeure faible. L'homme se déplace en effet avec beaucoup plus d'efficacité vers une cible qu'il voit, plutôt que vers un bruit qu'il entend.

- Il y a risque de superposition et de confusion des messages sonores dans le cas où le choix entre plusieurs sorties s'offre à la population de la salle.

- Si l'issue depuis la salle initiale ne donne pas directement sur l'extérieur ou sur une zone refuge, et que les évacuants se retrouvent ainsi dans une nouvelle salle depuis laquelle ils doivent à nouveau rechercher l'issue, il est alors clair que les installations d'alarme sonore de la première salle risquent d'interférer avec celles de la seconde, et d'induire en erreur les individus en les faisant rebrousser chemin.

- Si la salle à évacuer comporte des obstacles qui ne bloquent pas toute la hauteur sous plafond, la propagation directe du son en provenance de l'alarme au-dessus ou en dessous des obstacles risque de fausser la perception des individus sur le chemin à suivre.

Ces problèmes pratiques expliquent le fait qu'il n'existe pas, à notre connaissance, d'exemple de mise en oeuvre de guidage sonore d'évacuation.

Pour clore ce sous-chapitre consacré aux problèmes de perception humaine de l'environnement en situation d'incendie, mentionnons également les études effectuées, pour le cas des établissements disposant d'installations permettant la diffusion sonore de messages d'évacuation, sur le "format" (longueur, intonation, structure et intelligibilité du message, voix masculine ou féminine,...)¹⁹ de ces messages.

1.3. "Way-Finding" (orientation spatiale)

Un aspect capital du comportement d'évacuation des occupants, étroitement lié aux questions précédentes de perception de l'environnement, est le problème de l'élaboration de la part de l'individu de sa stratégie d'évacuation, et plus précisément, celle de la recherche des itinéraires susceptibles de conduire la personne à la sortie. C'est ce processus cognitif que les anglo-saxons désignent sous le terme de *way-finding*, expression plus appropriée que celle d'*orientation spatiale*. Qui ne s'est perdu dans un environnement spatial non familier, ou même assez familier?

Les psychologues spécialistes du sujet ont élaboré des modèles de représentation complexes du processus humain de *way-finding*²⁰. Ces modèles pourraient être qualifiés de fondamentaux, par rapport aux conclusions d'ordre pratique qu'il serait possible d'en tirer.

¹⁹ [SHAVIT 78]

²⁰ [WEISMAN 81], [EVANS 84], [COUSINS 83]

L'enquête menée par Weisman²¹ sur les problèmes d'orientation des étudiants dans 10 bâtiments du campus de l'université de Chicago présentant entre eux des différences importantes (taille, forme), a mis en évidence la complexité du sujet:

- 14% des occupants se sont sentis au moins une fois totalement désorientés dans un de ces bâtiments;
- plus grave: 9% affirment avoir fréquemment ou presque toujours des problèmes d'orientation dans certains bâtiments précis;
- la fréquence et la gravité des désorientations dans un bâtiment semblent corrélées entre elles;
- par contre, la corrélation entre la familiarité vis-à-vis d'un bâtiment et la résolution favorable des problèmes de way-finding semble paradoxalement faible.

De manière générale, Weisman conclut que:

- le temps nécessaire à la formulation de la stratégie d'évacuation augmente avec la complexité de la vue en plan du bâtiment,
- la connaissance générale d'un bâtiment, acquise au cours d'une longue période d'usage normal du bâtiment, peut contenir très peu d'information quant aux emplacement des issues de secours.

Wood²² confirme que dans les incendies d'immeubles d'habitation de petites dimensions, pour 1000 cas étudiés, 95 % des occupants ont quitté le bâtiment par le chemin emprunté pour y pénétrer. D'autre part, Best²³ rappelle l'influence des événements externes: les occupants deviennent d'autant plus dubitatifs sur le chemin qu'ils choisissent, que la quantité d'informations qu'ils ont à traiter pour suivre avec succès ce chemin augmente. Janis²⁴ affirme d'ailleurs que le stress induit par le temps perçu comme disponible pour l'évacuation peut constituer un facteur d'erreur dans l'orientation. Mackintosh et al²⁵ ont réalisé des expériences visant à démontrer l'influence de la densité d'occupation sur le "*cognitive mapping*" -terme introduit par Lars Lerup²⁶- c'est à dire la représentation mentale que se font les individus de l'espace environnant. Cette étude n'a pu cependant identifier si cet effet est d'ordre psychologique ou purement visuel (visibilité réduite en la présence de foule importante).

²¹ "Evaluating Architectural Eligibility - Way-Finding in the Built Environment" [WEISMAN 81]

²² cité dans [CROSSON 1982]

²³ cité dans [CROSSON 1982]

²⁴ cité dans [CROSSON 1982]

²⁵ "Two Studies of Crowding in Urban Public Spaces" [MACKINTOSH 1975]

²⁶ "Human Behavior in institutional Fires and its Design Implication" [LERUP 82]

Incidentement, un autre élément important a été mis en évidence, au cours de l'expérience suivante:

- il a été demandé à des volontaires de réaliser une série de tâches dans l'environnement d'une grande gare de chemin de fer (acheter des billets, trouver le bar,...);
- un plan sommaire de la gare a été fourni à la moitié de l'échantillon.

Ces dernières personnes n'ont fait pratiquement aucun usage du plan, et n'ont pas fait montre de meilleures performances, ni dans l'accomplissement des tâches, ni dans l'exercice de description a posteriori de l'environnement de la gare.

Il ne faut certainement pas se hâter de généraliser ces constatations, mais qui a réussi à comprendre le plan d'évacuation d'un bâtiment en moins d'une minute (sinon plus)? Or, une minute représente un temps très important par rapport à l'échelle des temps caractéristiques d'un incendie.

L'une des expérimentations les plus intéressantes de way-finding a été réalisée par Horiuchi²⁷:

- Des pompiers ont été amenés les yeux bandés dans un environnement complexe qui ne leur était pas familier, plus précisément le 6ème étage d'un grand magasin.
- Le bandeau a été retiré, et il leur a été demandé d'évacuer l'étage le plus rapidement possible, en courant.
- Une estimation de l'usage de chaque issue avait été préalablement établie en fonction de trois critères: distance minimale aux escaliers, répartition optimale en fonction de la largeur des escaliers, et visibilité de l'entrée de la cage d'escalier.

La répartition effective s'est révélée plus proche de celle basée sur le critère de visibilité.

Il faut donc retenir qu'il est probable qu'en conditions d'urgence, les occupants préfèrent se diriger vers une issue lointaine mais visible, plutôt que de rechercher une autre issue qu'ils savent éventuellement plus proche, mais qu'ils ne voient pas: un itinéraire d'évacuation non vu aura tendance à être ignoré. Ceci tend a fortiori à confirmer ce que beaucoup d'auteurs affirment: un chemin non connu (a fortiori un chemin non vu) est un chemin inexistant. Ceci implique également, en accord avec les principes exposés au sous-chapitre précédent sur la perception, la nécessité de favoriser la reconnaissance des itinéraires d'évacuation: les voies menant vers les

²⁷ "An Experimental Study on Exit Choice Behavior of Occupants in an Evacuation under Building Fire" [HORIUCHI 1980]

espaces protégés ou vers l'extérieur doivent être aisément distinguées des autres par la vue.

Nelson et MacLennan²⁸ indiquent que des problèmes de "way-finding" se posent plus fréquemment dans des situations impliquant un nombre faible de personnes dans un environnement peu familier. Ils identifient certains éléments architecturaux comme particulièrement susceptibles de générer des problèmes d'orientation: les culs-de-sac²⁹, les angles obtus, les couloirs concentriques,... Pour Passini³⁰, les grands bâtiments modernes à architecture complexe sont souvent le siège de problèmes d'orientation.

1.4. Réactions et facultés humaines en milieu enfumé

La fumée -et dans une moindre mesure la chaleur- constituent des facteurs pouvant conditionner de manière déterminante le déroulement d'une évacuation. Rappelons ici que l'intoxication par la fumée représente d'ailleurs la 1ère cause de mortalité en cas d'incendie à victimes multiples³¹.

La présentation des aspects toxicologiques dépasse de beaucoup les prétentions de ce mémoire. Il semble cependant indispensable d'indiquer très brièvement les éléments suivants:

- l'effet toxique du monoxyde de carbone paraît dominant,
- les facultés mentales elles-mêmes semblent être affectées par de faibles expositions au CO.

Indépendamment de l'effet purement toxicologique, la fumée entrave à de multiples niveaux le mouvement d'évacuation: stress, mauvaise visibilité des repères pour la marche, nécessité de progresser courbé, difficulté d'identification de l'environnement, non-visibilité des signaux,...

D'une manière générale, la fumée est la raison principale incitant ou obligeant les évacuants à rebrousser chemin. Dans une analyse de 335 incendies avec interviews

²⁸ "Emergency Movement" [NELSON 88]

²⁹ La réglementation française des Etablissements Recevant du Public prévoit des restrictions sur la disposition et la longueur des culs-de-sac.

³⁰ [PASSINI 84]

³¹ [BIRKY 82]

des personnes impliquées, Bryan³² a observé que la *fumée seule* était à l'origine de 61% des cas où les personnes ont dû rebrousser chemin, et de 92% des cas en association avec une autre cause (voir chap.1 §II.). A titre indicatif, la chaleur seule ne représente que 5% des cas de changement d'itinéraire.

Quant aux effets psychologiques de la fumée, il est intéressant de décrire les expériences de Jin³³:

- Il fut demandé à des volontaires de traverser un long couloir dans lequel étaient simulées des conditions variables d'enfumage et de chaleur (à l'aide de panneaux radiants);
- Divers tests de mémorisation et de calcul mental, réitérés à intervalles de distance réguliers, ont servi à évaluer l'état intellectuel des sujets.



Les facultés des personnes, et notamment leurs performances en calcul mental, se sont sensiblement dégradées en présence de fumée, alors qu'elles ne furent que faiblement affectées par la présence de chaleur seule. Cette expérience a mis en évidence un autre élément important, dont l'interprétation rappelle encore une fois les concepts de la psychologie du Gestalt: alors que 29% des personnes soumises à l'expérience avec chaleur seule ont déclaré que les conditions de chaleur à proximité du panneau radiant étaient *intolérables*, ce pourcentage chute à 7% pour le groupe d'occupants soumis à la fois à la chaleur et la fumée!

Une étude antérieure à celle de Jin est encore plus intéressante car elle illustre de manière exemplaire la difficulté de modélisation du comportement humain confronté à des conditions critiques, comme dans le cas d'un incendie. L'expérience de Latane et Darley³⁴ a porté sur les conditions susceptibles de provoquer une inhibition de la réponse des personnes à des stimuli objectivement dangereux. Il est demandé à des étudiants de remplir un questionnaire dans une salle d'attente de l'université. Pendant que l'étudiant remplit le questionnaire, de la fumée est introduite dans la salle par la bouche de ventilation. Si le sujet ne réagit pas après 6 minutes, l'expérience est interrompue. Les résultats sont les suivants:

- Si le sujet se trouve *seul* dans la salle, dans 75% des cas il interrompt son devoir et signale la présence de fumée.

³² "Human Behavior in Fire Situations" [BRYAN 76]

³³ "Studies of Emotional Instability in Smoke Fires - Decrease of Thinking Powers and of Memory in Fire Smoke" [JIN 82],
"Emotional Instability in Fire Smoke" [JIN 88],
"Experimental Study on Human Emotional Instability in Smoke Filled Corridor: Part 2" [JIN 90]

³⁴ cité dans [NELSON 88]

- Si deux complices des expérimentateurs, passifs, se trouvent dans la salle en même temps que le sujet, le pourcentage de réaction n'est plus que de 10%!... Les auteurs soulignent que dans les autres cas (90%) l'étudiant continue à remplir docilement son questionnaire en toussant et chassant la fumée à l'aide de ses mains...
- Si les deux complices sont remplacés par deux autres étudiants remplissant eux aussi un questionnaire, dans 38% des cas la fumée est signalée.

1.5. Entraînement

Dans de nombreux pays et suivant le type de bâtiment, la réglementation impose le déroulement, à intervalles réguliers, d'exercices d'évacuation, et plus généralement exige un entraînement spécifique des acteurs (personnel, utilisateurs, habitants) à la gestion de la situation de danger spécifique au type de bâtiment. Les exercices sont jugés bénéfiques en règle générale, et indispensables dans certains cas où l'évacuation doit se dérouler de manière minutieusement organisée (hôpitaux,...).

Il est cependant nécessaire de signaler que certaines des hypothèses sous-jacentes à la pratique des exercices d'évacuation n'ont jamais été étudiées expérimentalement, par exemple l'adéquation entre les scénarios des exercices et le danger réel au cours de l'incendie (ex: l'exercice d'évacuation peut conditionner un occupant à utiliser un itinéraire particulier, or cet itinéraire peut être bloqué lors de l'incendie réel), ou bien encore l'application des réponses mémorisées au cours des exercices à la situation réelle de danger, surtout si l'on tient compte du fait que la population ne se montre pas toujours coopérative et se plie souvent de mauvais gré à l'exercice. Il ne faut pas non plus négliger que la répétition trop fréquente de ces exercices risque d'une part de lasser les personnes et par conséquent de diminuer l'efficacité de l'exercice, et d'autre part d'accoutumer les occupants qui peuvent ainsi sous-estimer l'alarme d'évacuation quand un danger réel se présente.

Dans ceux des Etablissements Recevant du Public où le danger potentiel est élevé, l'entraînement et la préparation à l'évacuation jouent globalement un rôle positif incontestable, comme le démontrent les nombreux incidents où la réaction du personnel fut exemplaire³⁵.

³⁵ [HERZ 78], [BICKMAN 79], [BRYAN 81]

1.6. Degré d'organisation de l'évacuation

L'évacuation d'un immeuble lors d'un sinistre réel sera d'autant mieux organisée et se déroulera dans une ambiance meilleure de coopération qu'il préexiste des liens affectifs entre les évacués.

Au contraire, le stress induit par les difficultés d'évacuation est d'autant plus susceptible de favoriser l'adversité entre occupants que ceux-ci ne se connaissent pas ou peu. Ceci peut rendre l'évacuation compétitive et favoriser l'apparition de phénomènes de panique. De telles circonstances sont par exemple plus probables parmi les visiteurs d'un ERP, que parmi la population d'un immeuble collectif.

La littérature existante, constituée à partir de l'analyse de sinistres, reconnaît de manière générale l'influence bénéfique de la présence d'un "leader" -responsable de l'évacuation- sur le bon déroulement de celle-ci et la diminution du risque de manifestation de phénomènes de panique. Cependant, nombreux sont les spécialistes qui relativisent cette influence, car l'attitude typique de la population dans les grands incendies est de ne pas attendre qu'une personne autorisée leur indique l'attitude à suivre³⁶.

³⁶ [CROSSON 82]

II. LE COMPORTEMENT HUMAIN DURANT L'INCENDIE

Suite à ce bref exposé sur divers aspects psychologiques relatifs au déroulement d'une procédure d'évacuation, il est intéressant de présenter de manière succincte les travaux d'observations du comportement humain en situation d'incendie, ainsi que les tentatives d'élaboration de modèles de comportement découlant de ces observations.

II.1. Etudes du comportement humain durant l'incendie

De nombreux auteurs, notamment en Grande-Bretagne, ont entrepris d'observer et étudier le comportement humain en situation d'incendie³⁷. L'effort a souvent concerné la reconstruction d'épisodes comportementaux tels que définis par Lerup³⁸ (voir sous-chapitre suivant), au moyen de techniques évoluées de recueil de témoignages³⁹, incitant à une structuration du récit sous la forme de séquences du type:

J'ai senti de la fumée , alors je suis sorti en courant dans le couloir , pour voir d'où provenait la fumée
Indice ou stimulus , *Action* , *But*

Par la suite, il est possible de traiter l'information du récit afin de tenter de dégager des séquences typiques de comportement.

Nous nous contentons ici de mentionner particulièrement les travaux de Bryan⁴⁰, qui a été celui qui dans un passé proche a mené les plus importantes campagnes d'observation du comportement humain en situation d'incendie, pour le compte du National Bureau of Standards. Ses travaux ont essentiellement consisté en une simple collecte de données statistiques, aspirant à un recensement dépouillé et objectif des actions des individus, plutôt que sur l'induction de modèles ou de concepts interprétatifs généraux à partir de ces observations. En d'autres termes, Bryan n'a pas cherché, au travers de ses observations, à valider un modèle de comportement établi a priori, ce qui aurait éventuellement pu biaiser les observations.

³⁷ [WOOD 72], [WOOD 79], [BREAUX 76], [BRYAN 76], [BRYAN 77], [BRYAN 81], [BRYAN 76], [BRYAN 82a], [BRYAN 82b], [BRYAN 88], [KEATING 84], [LERUP 82], [ZELTZER 85], [ZELTZER 86], [ZELTZER 87]

³⁸ "People in Fires: A Manual for Mapping" [LERUP 77a],
 "Human Behavior in institutional Fires and its Design Implication" [LERUP 77b]

³⁹ [BREAUX 76], [KEATING 84]

⁴⁰ voir note 37

11.1.1. Etude 1974 - 1976

Cette étude⁴¹ a porté sur des incendies d'immeubles d'habitation de 11 districts de sapeurs-pompiers de l'Etat du Maryland, dans la période 1974-1976. L'enquête comportait notamment une interview des personnes impliquées d'une manière ou d'une autre dans un incendie. Ainsi furent rassemblées 584 interviews portant sur 335 cas d'incendie. Les résultats sont présentés sous forme sommaire et récapitulative dans les tableaux ci-après.

Mode de prise de connaissance du feu	
a été alerté	34%
a senti une odeur de brûlé	25%
bruit en provenance du feu (bris,...)	18%
a vu la fumée	9%
a vu le feu	7%

Pour ce qui concerne les actions entreprises par les occupants suite à la découverte du feu, l'auteur établit une classification en 3 grandes catégories:

- alerte
- recherche et combat du feu
- fuite.

Succession chronologique des actions des personnes impliquées	Première Action	Deuxième Action	Troisième Action
Prévenir d'autres occupants	14%	10%	6%
Alerter les pompiers	9%	15%	13%
Prévenir quelqu'un pour qu'il alerte les pompiers	2%	3%	4%
Quitter l'immeuble	8%	21%	35%
Quitter le local	5%	3%	-
Chercher le feu	10%	2%	-
Combattre le feu	5%	6%	12%
Chercher un extincteur	5%	6%	-
Se diriger vers le local en feu	2%	-	-

⁴¹ [BRYAN 76]

Succession chronologique des actions par thème général	Première Action	Deuxième Action	Troisième Action
Actions d'alerte	25%	28%	23%
Actions de fuite	13%	24%	35%
Actions d'investigation et de combat	22%	14%	12%

23% des occupants ont essayé de combattre le feu	
Fréquence chez les hommes	Fréquence chez les femmes
32%	16%

18% des occupants ont été à un moment contraints de rebrousser chemin, à cause:	
de la fumée seule	61%
de la fumée et de la chaleur	31%
de la chaleur seule	5%
autre raison	3%

28% des occupants se sont réintroduits dans le bâtiment après l'avoir quitté	
Fréquence chez les hommes	Fréquence chez les femmes
36%	21%

II.1.2. Project People II (1981)

Cette deuxième campagne⁴² a porté sur 59 incidents de feu dans des établissements de soins, de 1977 à 1980, et a abouti à 150 interviews de membres du personnel de ces établissements, et 53 interviews de sapeurs-pompiers. Le tableau suivant présente la succession des actions des membres du personnel.

⁴² [BRYAN 81], [BRYAN 82b]

Décomposition des actions du personnel (%)	1ère action			2ème action			3ème action		
	F	H	T	F	H	T	F	H	T
explorer les indices	41	55	45	6	10	7			
fermer les portes	18	3	11	12	7	10	7	13	10
assister les patients en danger	8	3	7	6	7	6			
a découvert le feu	9	0	7	11	3	9			
donner l'alarme	5	5	5	8	3	7			
évacuer les patients	5	3	5	22	13	19	41	19	36
rechercher un extincteur	1	13	4	2	13	4			
tenter d'éteindre le feu				6	23	10	11	30	19
téléphoner au standard	2	5	3	5	7	5	6	0	5
ventiler la salle	0	5	1						
prévenir les responsables du personnel							3	9	4
téléphoner aux pompiers				10	7	9	6	4	6
attente							6	0	5
tentative de sauvetage							3	9	4

Légende:

F: Femmes

H: Hommes

T: Total

XX Action la plus fréquente

XX 2ème action la plus fréquente

XX 3ème action la plus fréquente

Le tableau suivant récapitule les différences significatives de comportement chez le personnel féminin et masculin.

Principales différences dans les actions des hommes et des femmes	Femmes (%)	Hommes (%)
fermer les portes (1ère/2ème/3ème action)	18 / 12 / 7	3 / 7 / 18
évacuer les patients (2ème/3ème action)	22 / 41	13 / 18
rechercher un extincteur (1ère/2ème action)	1 / 2	13 / 13
tenter d'éteindre le feu (2ème/3ème action)	6 / 11	23 / 30

Ce que l'étude ne révèle pas, c'est si ces différences de comportement reflètent une prédisposition psychologique différente chez les hommes et les femmes, ou sont la conséquence d'une éventuelle répartition des fonctions entre la population masculine et féminine à l'intérieur de l'établissement (Y a-t-il par exemple une majorité d'hommes chez le personnel de maintenance, de femmes chez le personnel infirmier?).

II.1.3. Synthèse

Ces deux études n'ont été présentées ici qu'à titre indicatif. Elles sont assez représentatives des tendances générales mises en évidence par la plupart des observations. Si l'on examine les résultats à un premier degré de simple recensement d'attitudes comportementales, sans chercher à établir des relations de causalité ou de dépendance, il est possible de retenir les éléments majeurs suivants:

- Dans tous les cas de figure, il se manifeste chez les individus un besoin pressant d'information sur le danger et son origine. Ceci s'explique surtout par le fait que les indices révélant la manifestation d'un incendie sont souvent ambigus. Ce désir est satisfait soit par déplacement vers la source du danger, soit en s'informant auprès d'autres individus,...

- Il existe des différences significatives de comportement selon l'établissement, la fonction de chaque individu, la familiarité avec les lieux, etc.

- Les phénomènes de comportement social et associatif sont très fréquents. Sime⁴³ parlera même de comportement affiliatif: en cas de danger, les individus ont tendance à se diriger vers les personnes et les lieux qui leur sont familiers.

- Le comportement des hommes et des femmes présente des différences importantes: par exemple, les tentatives de combattre le feu sont beaucoup plus fréquentes chez les hommes.

II.2. Modèles comportementaux

Lars Lerup⁴⁴ a introduit les notions d'*épisode de comportement* et de "*mapping*" *comportemental* pour décrire les réponses de l'individu, et l'ordonnancement de ces réponses, en situation d'incendie. La plupart des auteurs, sans introduire de termes nouveaux, aboutissent à la même conclusion: il est possible de décomposer le comportement humain en une séquence d'actions cohérentes.

⁴³ [SIME 85]

⁴⁴ "*People in Fires: A Manual for Mapping*" [LERUP 77a],
 "*Human Behavior in institutional Fires and its Design Implication*" [LERUP 77b]

Les catégories générales d'actions que retiennent les divers auteurs sont assez proches, sauf pour Canter (l'ordre des actions n'est pas significatif):

Catégories principales d'actions des individus en situation d'incendie		
<i>Lerup</i>	<i>Canter</i>	<i>Bryan</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Explorer • Alerter • Combattre le feu • Fuir • Sauvetage • Pas d'action 	<ul style="list-style-type: none"> • Activité avant le feu • Perception des indices • Définition de la situation • Préparation (donner des instructions, explorer) • Action (attendre passivement, fuir, assister, combattre le feu) 	<ul style="list-style-type: none"> • Actions d'alerte • Actions de fuite • Actions de combat • Actions d'assistance

L'étape suivante dans la construction d'un modèle de comportement, consiste à analyser les enchaînements d'actions afin d'essayer d'identifier des séquences de comportement dominantes; c'est à ce sujet que Canter utilise le terme de *diagrammes de décomposition* et Lerup celui de "*behavior maps*". D'un point de vue technique, certains auteurs établissent des matrices de probabilité de transition d'une action à l'autre, ce qui fait nécessairement penser aux chaînes de Markov (sauf que la variable *temps* n'apparaît explicitement pas à ce stade-là de l'analyse). Il est ainsi possible de valuer les arcs du diagramme de décomposition à l'aide d'un indice de corrélation calculé à partir des probabilités de transition⁴⁵.

Ces travaux ont inspiré la réalisation de deux programmes expérimentaux de simulation probabiliste du comportement humain en situation d'incendie, aux principes de base assez proches: celui de Filiz Ozel⁴⁶, et notamment celui développé au CSTB par Wassim Iskandarani⁴⁷, qui constitue une proposition plus élaborée et aboutie, et qui permet également la représentation élémentaire de certains phénomènes physiques du développement de l'incendie. Ces deux approches s'inspirent notamment de la décomposition du comportement humain selon les schémas préconisés par Lerup. On y trouve par conséquent de nombreux éléments communs, qui ne seront pas explicités ici, mais seulement mentionnés à titre d'information: le *générateur de but* (attribution d'un but à l'occupant), le *modificateur de but*

⁴⁵ [CANTER 80], [KEATING 84]

⁴⁶ "A Stochastic Computer Simulation of the Behavior of People in Fires: An Environmental Cognitive Approach", [OZEL 85]

⁴⁷ [ISKANDARANI 91]

(changement du but en fonction de l'évolution de l'environnement), la *bibliothèque des actions*, etc.

Les modèles de comportement humains, qu'ils soient qualitatifs comme ceux proposés par les expérimentateurs, ou encore informatiques, sont d'une utilité explicative certaine; leur portée prédictive demeure cependant limitée, selon Lerup même qui, suite à l'étude de 10 incendies d'hôpitaux⁴⁸, constate que chaque établissement constitue un cas à part, possédant des spécificités susceptibles d'engendrer des comportements significativement divergents. A cela, il suffit d'ajouter la variabilité des séquences dominantes en fonction du type d'établissement (hôpital, bureaux, habitation), du sexe, de la fonction de la personne (patient, personnel, propriétaire, locataire), etc.. pour constater qu'il est difficile d'aboutir à un schéma globalisant de comportement humain en situation d'incendie.

⁴⁸ "Human Behavior in institutional Fires and its Design Implication" [LERUP 77b]

III. SYNTHÈSE

Nous avons vu au cours de ce chapitre que la manière dont se déroule un processus d'évacuation dépend en réalité d'une multitude de facteurs difficilement appréhendables, d'ordre psychologique ou "sociologique" au sens large du terme. Nous pouvons par conséquent dès maintenant déclarer que toute tentative de modélisation de l'aspect cinématique du problème de l'évacuation se devra de clarifier les limitations qui découlent des hypothèses de cette nature sur lesquels le modèle se fonde.

Outre la difficulté énorme de prédiction de l'attitude spécifique dont chaque individu fait montre dans chacun de ces divers domaines de comportement (par exemple: recherche de l'itinéraire d'évacuation), l'observation à un niveau plus général du comportement des personnes impliquées dans des cas *réels* de feu, révèle elle aussi la difficulté de représentation du comportement humain en telle situation à l'aide de schémas généraux. Par contre, ces observations démontrent a posteriori la **cohérence** des séquences comportementales que les individus adoptent vis-à-vis du danger. Ceci confirme que, contrairement à une idée couramment répandue, la "panique" n'est pas un phénomène fréquent et indissociable de l'incendie.

Cet examen des aspects psychosociologiques liés à l'incendie amène également à d'autres conclusions intéressantes du point de vue des objectifs de cette thèse:

1. Les phénomènes comportementaux liés aux problèmes d'orientation spatiale, tiennent une place moins importante dans le cas de présence de foule dense.
2. Les attitudes irrationnelles dans un processus d'évacuation demeurant finalement rares et marginales, une démarche de modélisation de l'aspect cinématique (particulièrement en configuration impliquant une population importante) de ce processus acquiert tout son sens. De plus:
 - si, à travers une démarche de modélisation nous sommes en mesure de proposer des dispositions visant au meilleur déroulement de l'évacuation,
 - alors, l'augmentation de la probabilité de réussite de l'évacuation d'un bâtiment ira de pair avec une évolution dans le sens inverse de celle d'apparition de phénomènes irrationnels.

C H A P I T R E 2

T R A V A U X D ' E T U D E E T D E

M O D E L I S A T I O N D U M O U V E M E N T

D E P E R S O N N E S

La complexité des phénomènes concomitants au mouvement d'évacuation d'un bâtiment n'a pas dissuadé les responsables de la protection vis-à-vis de l'incendie d'aborder très tôt la question de l'évacuation, et de formuler des propositions visant à apporter des améliorations dans la manière de concevoir et construire les bâtiments. Ainsi, dès 1918, la "*National Fire Protection Association*" (Etats Unis d'Amérique) préconisait des règles concernant le dimensionnement des issues de secours. En 1935 et 1937 respectivement, Américains (N.B.S.) et Soviétiques (Académie des Arts) entreprenaient leurs premières observations du mouvement de personnes.

Dans ce chapitre, nous allons présenter une synthèse bibliographique des travaux relatifs à l'évacuation des bâtiments et au mouvement de foule, depuis les simples études d'observation jusqu'aux approches essentiellement théoriques et codes de calcul informatiques, en passant par les méthodes empiriques. Les frontières entre ces différentes approches sont difficiles à tracer. Nous avons décidé de classer ces travaux de la manière suivante:

- I. Modèles qualitatifs de représentation du mouvement de personnes.***
Nous choisissons de présenter ces approches en premier, car elles favorisent une meilleure compréhension des hypothèses sous-jacentes aux études d'observation.
- II. Etudes d'observation du mouvement de foule et formules empiriques.*** Il s'agit de présenter les grands travaux d'observation qui ont permis d'identifier et souvent quantifier les grandeurs caractéristiques du mouvement de foule. Des formules empiriques simples ou des méthodes de calcul manuelles, découlant directement ou indirectement de ces observations, sont également présentées.

III. Codes de calcul. Nous présentons dans cette dernière partie du chapitre les approches plus élaborées de modélisation et simulation du mouvement de foule qui ont pu être entreprises ces 10 dernières années, grâce au recours à l'informatique.

I. MODELES QUALITATIFS DE REPRESENTATION DU MOUVEMENT DE PERSONNES

Divers modes de représentation du mouvement de personnes ont été proposés. Plutôt que de véritables modèles au sens actuel du mot, il s'agit en fait de représentations assez qualitatives, établies par analogie à des phénomènes physiques. Ces représentations sont certes de portée réduite mais permettent une première approche conceptuelle du problème du mouvement des personnes. Deux catégories sont à distinguer: la configuration à haute densité de personnes, et celle à faible densité.

1.1. Haute densité: les modèles de gravité

Les modèles qualitatifs de représentation du mouvement de personnes à haute densité pourraient être regroupés sous le terme générique de *modèles de gravité*: il s'agit en fait d'une analogie introduisant une force motrice qui n'est autre que l'accélération de la pesanteur. La faiblesse principale de cette représentation, qui restreint de manière significative l'étendue de l'analogie, réside dans le principe-même d'analogie: il n'existe pas de véritable "force motrice" provoquant le déplacement (outre la volonté des individus) dans le système réel que l'on veut représenter. Ainsi, dans le modèle analogue le mouvement est soumis à une accélération constante et voit, par conséquent, sa vitesse croître indéfiniment (dans la limite des frottements), alors que le déplacement des personnes est caractérisé de manière intrinsèque par une vitesse maximale, qui est celle qui correspond à des conditions de déplacement à densité d'occupation nulle.

1.1.1. Le modèle de particules solides

Le modèle de particules solides a été proposé par Peschl⁴⁹. Dans des conditions de forte densité, d'importantes forces d'interaction (ou de friction) se développent entre les individus. L'image qui vient naturellement à l'esprit est celle du sablier.

⁴⁹ Peschl I., "Doorstromingscapaciteit van deuropeningen bij panieksituaties (*Passage Capacity of Door Openings in Panic Situations*)", p.62-67, Bouw, Vol 28, No. 2, 9, 1971
cité dans [CROSSON 82]

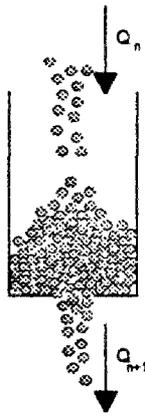


Fig. 4 - Analogie du sablier pour la modélisation du mouvement de personnes

L'analogie granulaire est particulièrement adaptée à la représentation du phénomène de formation d'arches aux issues de portes étroites dans des conditions de forte densité.

Les arches, observées par plusieurs auteurs, sont des amas d'individus à très haute densité. Dans de telles conditions de compression, les personnes peuvent se bloquer mutuellement en formant une sorte d'arche de courbure opposée à la direction du mouvement [Fig. 5].

Des pressions très importantes se développent alors, et quand une personne réussit enfin à s'extraire de l'arche pour franchir la porte, la rupture de l'équilibre provoque la dislocation brutale de l'arche, avec des risques importants de blessure et de chute. Si la queue en amont continue à exercer de fortes pressions, l'arche se reforme aussitôt.

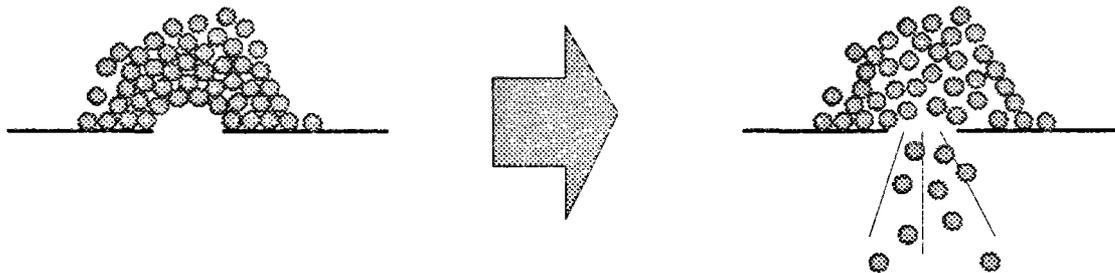


Fig. 5 - Formation et dislocation de l'arche dans un passage de porte.

Peschl a particulièrement étudié expérimentalement les conditions d'apparition de ces pulsations: formation-rupture de l'arche (voir chap.2 § II.3.4.).

1.1.2. Le modèle hydraulique

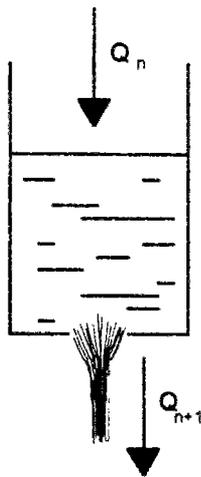


Fig. 6 - Analogie hydraulique pour la modélisation du mouvement de personnes

L'analogie hydraulique est un second modèle de gravité proposé par Archea⁵⁰. Les phénomènes de formation d'arches n'y sont pas représentés, mais cette approche possède un intérêt pédagogique certain, puisqu'elle permet de faire apparaître de manière plus intelligible certaines grandeurs caractéristiques du mouvement, -par exemple le débit dans une issue, par rapprochement au débit que donne une loi d'orifice en hydraulique-, ou encore des phénomènes tels que la variation de ce débit en fonction de la pression etc...

1.2. Faible densité: le modèle gazeux

Ce modèle proposé par Henderson⁵¹ pour la description du mouvement piéton à faible densité fait référence à la théorie cinétique des gaz de Maxwell-Boltzmann. En accord avec cette représentation les piétons peuvent être considérés:

1. statistiquement indépendants en vitesse et position,
2. comme se déplaçant à une vitesse décorrélée de leur position.

Ce modèle pourrait, par exemple, servir à fournir une image qualitative des trajets de déplacement dans une grande salle d'échange d'une gare de transports (gare ferroviaire, aéroport, salle de correspondance du métro,...), en dehors des heures de pointe.

⁵⁰ cité dans [CROSSON 82]

⁵¹ Henderson J.T., "The Statistics of Crowd Fluids", p.381-383, Nature, 229, 1971
cité dans [CROSSON 82]

II. TRAVAUX D'ETUDE ET D'OBSERVATION DES ASPECTS CINEMATIQUES DE L'EVACUATION

De nombreux travaux d'observation des mouvements de foule ont été réalisés depuis le début du siècle, notamment en (ex-)Union Soviétique, au Japon, aux Etats-Unis, en Grande Bretagne et au Canada. Ces travaux ont souvent permis de dégager des lois empiriques corrélant notamment vitesse de déplacement et densité d'occupation, lesquelles lois ont parfois donné lieu à des règles de calcul simples permettant d'évaluer de manière grossière un temps d'évacuation total.

II.1. Constatations et hypothèses communes à toutes les études

La plupart de ces études sont basées sur des principes communs, et ont logiquement abouti à des constatations proches.

1. Le temps total d'évacuation d'un bâtiment peut être décomposé en *temps net d'évacuation*, terme qui désigne le temps strictement dédié au déplacement vers la sortie, et en temps consacré à des activités dites "comportementales".

$$\text{Temps total d'évacuation: } T_e = T_{net} + T_{comportement}$$

Cette deuxième composante, souvent aussi importante, si ce n'est plus, que la première, regroupe les éléments suivants:

- *Temps de latence*: temps entre la déclaration de l'incendie et sa perception
- *Temps de préparation*
- *Temps consacré aux tentatives d'extinction*
- *Temps consacré au traitement des informations et aux prises de décision*
- *Temps de recherche de l'itinéraire à emprunter*

Nelson & MacLennan⁵² définissent de manière similaire:

$$\text{Temps réel d'évacuation: } T_{re} = T_{ce} \cdot e$$

T_{ce} : Temps calculé d'évacuation

e : coefficient d'efficacité apparente

Le coefficient d'efficacité e correspond approximativement aux mêmes activités que le temps $T_{comportement}$ introduit précédemment.

2. L'observation des déplacements de foules à haute densité, notamment à l'intérieur d'éléments de circulation rectilignes, renvoie inévitablement à l'analogie du passage d'un fluide à l'intérieur d'un conduit.

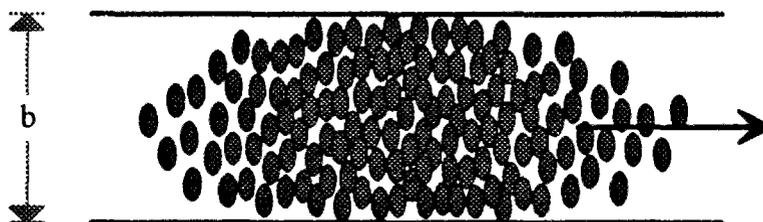


Fig. 7 - Déplacement d'occupants à haute densité dans un élément de circulation rectiligne horizontal (vue en plan)

Il n'est par conséquent pas étonnant que le choix des grandeurs permettant de caractériser le mouvement de personnes se déplaçant dans un élément de circulation densément peuplé, soit inspiré de cette analogie hydraulique.

Examinons donc un élément de circulation rectiligne à conditions uniformes (largeur, densité) [Fig. 8].

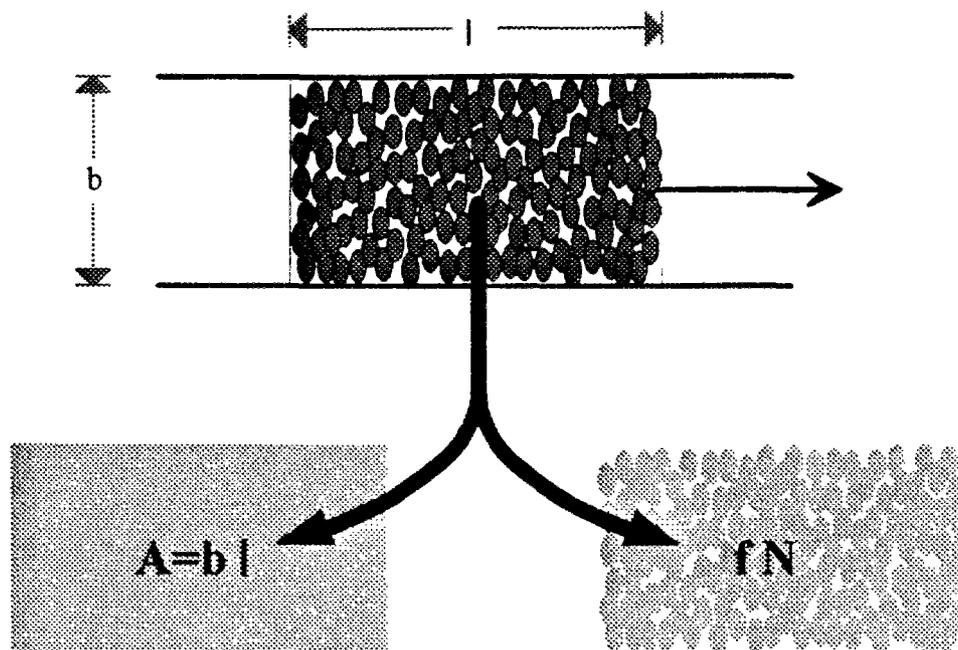


Fig. 8 - Déplacement d'occupants à haute densité dans un élément de circulation rectiligne horizontal

Les grandeurs utilisées pour la caractérisation du mouvement sont:

- N = Le nombre de personnes en mouvement
- f = La surface projetée au sol d'un individu (utilisée seulement par les auteurs Russes Predtechenskii et Milinskii), en mètres carrés
- A = L'aire dont disposent les occupants, en mètres carrés ($\neq f \cdot N$)
- d = La densité d'occupation. Sa définition varie suivant les auteurs:
 - $d_1 = N / A$ en nombre de personnes/m²
 - $d_2 = A / N$ en m²/personnes, utilisé surtout par les britanniques
 - $d_3 = f \cdot N / A$ sans dimension (= m² de personnes/m²), (dans la méthode Russe)
- v = La vitesse, supposée **uniforme** (nous reviendrons sur cette hypothèse), de déplacement du "paquet", en mètres par seconde
- b = La largeur offerte à la circulation (couloir, passage de porte ou escalier), en mètres
- $q = v \cdot d$ = Le débit unitaire, ou débit spécifique ou encore intensité de mouvement (dans la méthode russe):
 - en nombre de personnes par mètre de largeur et par seconde
 - en mètres par minute pour les auteurs Russes (= en mètres carrés de personnes par mètre de largeur et par minute).
- Q = Le débit de l'élément de circulation = $q \cdot b$:
 - en nombre de personnes par seconde
 - en mètres carrés (de personnes) par minute (méthode Russe).

3. La vitesse de déplacement est essentiellement fonction (décroissante) de la variable densité d'occupation. Il existe une limite supérieure de densité au-delà de laquelle la vitesse est nulle (le mouvement s'arrête).
4. En accord avec l'hypothèse précédente, nous supposons que la vitesse de toutes les particules-personnes formant le groupe en déplacement à densité uniforme est elle-même uniforme. Il s'agit en effet d'une hypothèse de travail retenue dans la plupart des travaux. Nous nous contentons à ce stade d'indiquer que cette hypothèse recouvre en fait plusieurs aspects:
 - La vitesse de déplacement est la même que l'on soit en tête ou à la queue du peloton.
 - Par conséquent, en l'absence d'une quelconque modification de la configuration du parcours (virage, escaliers, changement de la largeur, convergence avec un autre groupe de personnes,...), le peloton se déplace à vitesse uniforme, et donc sans subir aucune modification: la densité (et la vitesse) du peloton demeure(nt) constante(s) et uniforme(s) au cours du mouvement.
5. Comme la formule $Q = q \cdot b$ le suggère, les auteurs s'accordent pour affirmer (à l'exception de la variante de Pauls que nous présentons également dans ce sous-chapitre) que le débit est fonction linéaire de la largeur de la circulation (à densité égale).
6. La variation du débit spécifique (vitesse X densité) en fonction de la densité passe par un maximum, que l'on désigne par le terme *capacité spécifique*. Le produit de ce maximum avec la largeur b de la circulation détermine la *capacité* de la circulation.

Les hypothèses de travail 3 et 4 feront l'objet d'une plus ample discussion dans les chapitres suivants.

II.2. Présentation synthétique des résultats d'observation sur la corrélation vitesse-densité

II.2.1. Circulations horizontales (couloirs)

Nous présentons aux figures suivantes les différentes courbes $vitesse=f(densité)$ proposées dans la littérature. Par le symbole d nous désignons désormais la densité en personnes par mètre carré: $d = d_1$. La densité adimensionnelle sera quant à elle notée d' : $d' = d_3 = f \cdot d$.

CIRCULATIONS HORIZONTALES - Vitesse en m/s

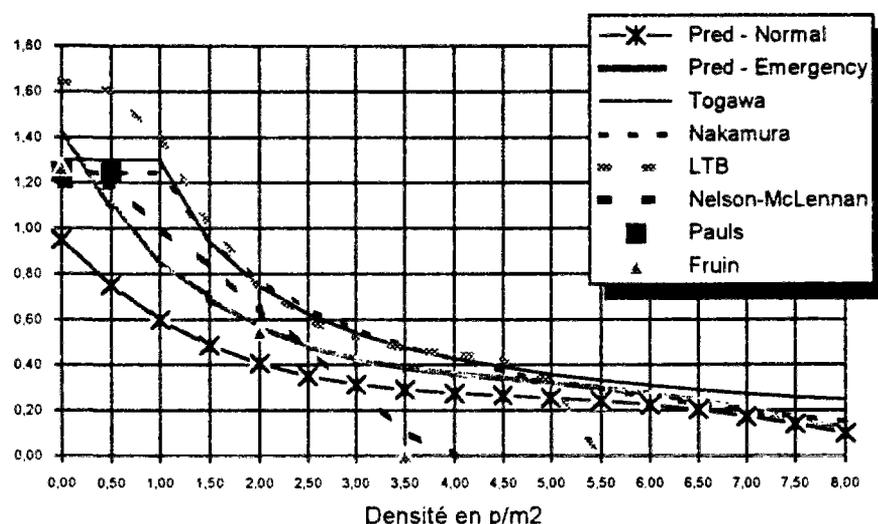


Fig. 9 - Courbes de variation de la vitesse de déplacement dans les circulations horizontales selon divers auteurs⁵³.

CIRCULATIONS HORIZONTALES - Vitesse en m/s

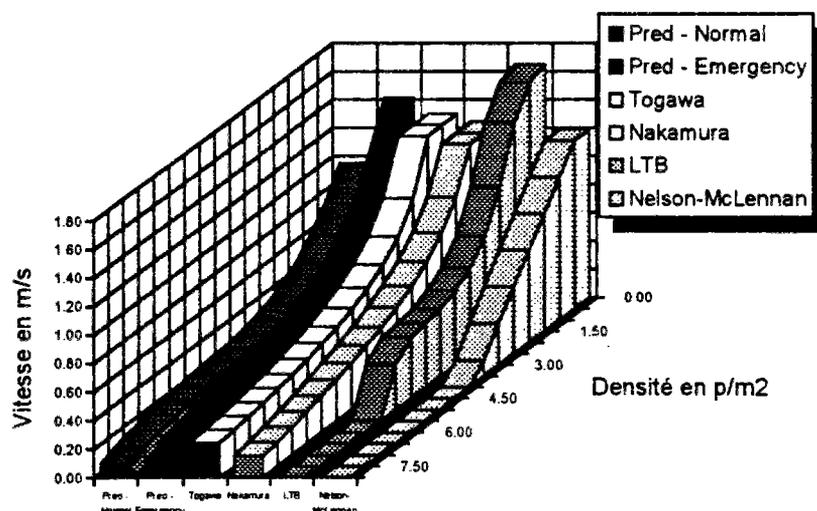


Fig. 10 - Variation de la vitesse de déplacement dans les circulations horizontales.

⁵³ Les courbes des auteurs russes ont été portées sur ce graphique et sur ceux qui suivent dans ce chapitre en convertissant la densité adimensionnelle en densité en personnes par mètre carré. Pour ceci, nous avons supposé la surface projetée par personne f égale à 0,125 mètres carrés, valeur couramment utilisée par les auteurs.

Formules utilisées : (v en m/s , d en $p./m^2$ sauf précisé différemment)

- **Predtechenskii & Milinskii**⁵⁴:

$$v_{normale} = 1/60 \cdot (112 d'^4 - 380 d'^3 + 434 d'^2 - 217 d' + 57)$$

$$v_{urgence} = (1,49 - 0,36 d') \cdot v_{normale}$$

$$d' = \text{densité adimensionnelle} = f \cdot d \text{ (p./m}^2\text{)}$$

f utilisé: $f = 0,125$ mètres carrés par personne

- **Togawa**⁵⁵:

$$v = 1,3 \cdot \min\{1, d^{-0,8}\}$$

- **Nakamura**⁵⁶:

$$v = -0,26 + (2,39/\max\{1, d\} - 0,13)^{0,5}$$

- **London Transport Board (LTB)**⁵⁷:

Le LTB ne fournit pas de formule: les valeurs ont été relevées sur des courbes

- **Nelson & MacLennan**⁵⁸: (formule établie d'après les observations de Fruin et Pauls)

$$v = 1,19$$

$$d < 0,5 \text{ p./m}^2$$

$$v = 1,37 - 0,263 \cdot 1,37 \cdot d$$

$$0,5 \text{ p./m}^2 \leq d < 3,8 \text{ p./m}^2$$

$$v = 0$$

$$3,8 \text{ p./m}^2 \leq d$$

Données ponctuelles complémentaires:

- **Pauls**⁵⁹: $d < 0,5 \text{ p./m}^2$, $\Rightarrow v = 1,25 \text{ m/s}$

- **Fruin**⁶⁰: $d = 0 \text{ p./m}^2$, $\Rightarrow v = 1,27 \text{ m/s}$

$$d = 2,15 \text{ p./m}^2, \quad \Rightarrow \quad v = 0,55 \text{ m/s}$$

$$d = 3,7 \text{ p./m}^2, \quad \Rightarrow \quad v = 0$$

La comparaison de ces courbes appelle les remarques suivantes:

- Tous les auteurs conviennent que la vitesse de déplacement libre (à densité quasi nulle) se situe approximativement entre $1,2$ et $1,5 \text{ m/s}$.

- Le seuil à partir duquel la vitesse de déplacement s'annule présente des différences significatives suivant la source.

⁵⁴ [PREDECHENSKII 78]

⁵⁵ Togawa K., Report No.14, Building Research Institute, Tokyo, 1985
cité dans [HORIUCHI 76], [CROSSON 82], [PAULS 88]

⁵⁶ Nakamura K. & Yoshioka M., "A Simulation Model of Pedestrian Flow and its Investigation", The Working Group on General Fuzzy Systems, Report No.1, Tokyo, November 1975
cité dans [HORIUCHI 76]

⁵⁷ London Transport Board, "Second Report of the Operational Research Team on the Capacity of Footways", London Transport Board, Research Report No.95, London, August 1958
cité dans [MELINEK 75], [CROSSON 82]

⁵⁸ [NELSON 88]

⁵⁹ [PAULS 88]

⁶⁰ cité dans [CROSSON 82], [PAULS 88]

La figure suivante présente la variation du débit spécifique q ($=v d$) découlant de ces courbes de vitesse.

CIRCULATIONS HORIZONTALES
Débit spécifique en $p/(m.s)$

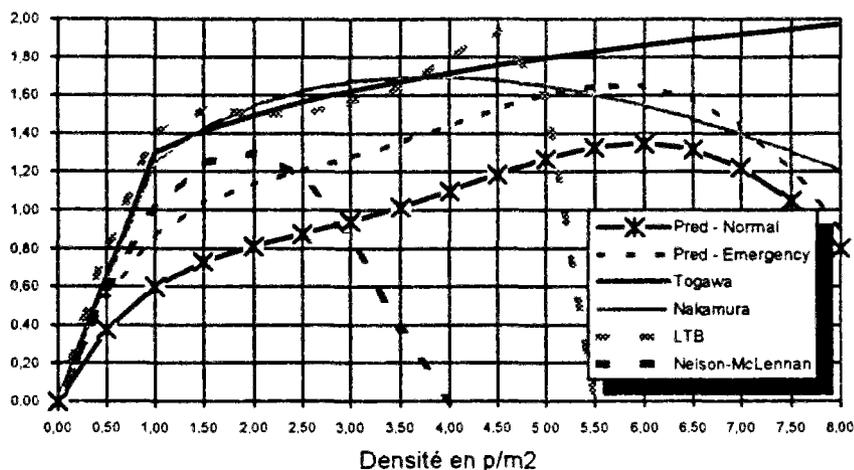


Fig. 11 - Courbes de variation du débit spécifique dans les circulations horizontales selon divers auteurs.

Le tableau suivant regroupe les données bibliographiques existantes sur la capacité des circulations horizontales.

Source	Capacité spécifique - circulations horizontales		
	$p / (m\text{-sec})$	$p / (m\text{-min})$	$m^2 \text{ de } p/(m\text{-min})^{61}$
Togawa (1955)	1,50	90	11,25
London Tr. Board (1958)	1,50 / 1,95 ⁶²	89 / 116	11,1 / 14,55
Galbreath (1969) ⁶³	1,20	71	8,9
Predtechenskii (1969)	1,35 / 1,65 ⁶⁴	81 / 99	10,15 / 12,4
Fruin (1971)	1,40	83	10,4
Nakamura (1975)	1,65	99	12,4
Melinek (1975) ⁶⁵	1,50	90	11,25
Nelson et al (1988)	1,65	99	12,4

Nous remarquons que les valeurs des capacités spécifiques des circulations horizontales présentent une dispersion relativement faible, par contre la densité pour laquelle le débit spécifique est maximal varie sensiblement d'une source à l'autre. Ce fait, à rapprocher des différences entre les diverses courbes vitesse= f (densité), permet de suspecter d'éventuels problèmes méthodologiques et métrologiques lors

⁶¹ Calcul basé sur une surface projetée par personne $f=0,125 m^2/p$.

⁶² La 1ère valeur correspond à la capacité recommandée pour la conception, la seconde à la capacité maximale observée.

⁶³ [GALBREATH 1969]

⁶⁴ Les deux valeurs correspondent respectivement aux conditions d'urgence et normale. (Rappel: $f=0,125 m^2/p$)

⁶⁵ [MELINEK 75]

des observations: il est difficile de définir et de mesurer la vitesse des occupants, pour ne pas mentionner les difficultés de mesure de la densité. Par contre, les mesures de débit d'évacuation en une section donnée sont très faciles à réaliser, et par voie de conséquence beaucoup plus fiables: il suffit de comptabiliser le nombre de personnes traversant une section d'élément de circulation en un intervalle de temps donné.

11.2.2. Passages de portes

Le tableau suivant nous informe sur la capacité spécifique dans les passages de porte et plus généralement les restrictions, selon divers auteurs:

Source	Capacité spécifique - portes		
	$p / (m \cdot sec)$	$p / (m \cdot min)$	$m^2 \text{ de } p / (m \cdot min)$
NBS (1935) ⁶⁶	1,80	107	13,4
Togawa (1955)	1,50	90	11,25
Predtechenskii (1969)	1,40 / 1,75 ⁶⁷	85 / 106	10,6 / 13,25
Melinek (1975)	1,70	102	12,75

Nous remarquons que dans les passages de portes les valeurs de vitesse et de débit relevées s'avèrent plus élevées que dans les sections continues. Ceci peut sembler paradoxal à première vue, étant donné que l'on pourrait s'attendre à un certain effet de bord provoquant des "frictions" plus importantes, ou pour reprendre l'analogie hydraulique à une "perte de charge". Or, c'est le contraire qui se produit: la pression en amont de la restriction, associée à la volonté des occupants de dépasser rapidement le goulot d'étranglement, provoque une augmentation momentanée et locale de la vitesse et par conséquent des débits, cette augmentation de la vitesse étant également rendue possible par le fait que tout de suite après la restriction la densité est relativement faible.

11.2.3. Circulations verticales (escaliers)

Sur les figures suivantes ont été portées les données disponibles dans la littérature sur la variation, en fonction de la densité, de la vitesse de déplacement dans les escaliers dans le sens de la descente (vitesse mesurée sur la pente du mouvement).

⁶⁶ cité dans [CROSSON 82]

⁶⁷ Les deux valeurs correspondent respectivement aux conditions d'urgence et normale. (Rappel: $f=0,125 \text{ m}^2/p$)

ESCALIERS (descendants) - Vitesse en m/s

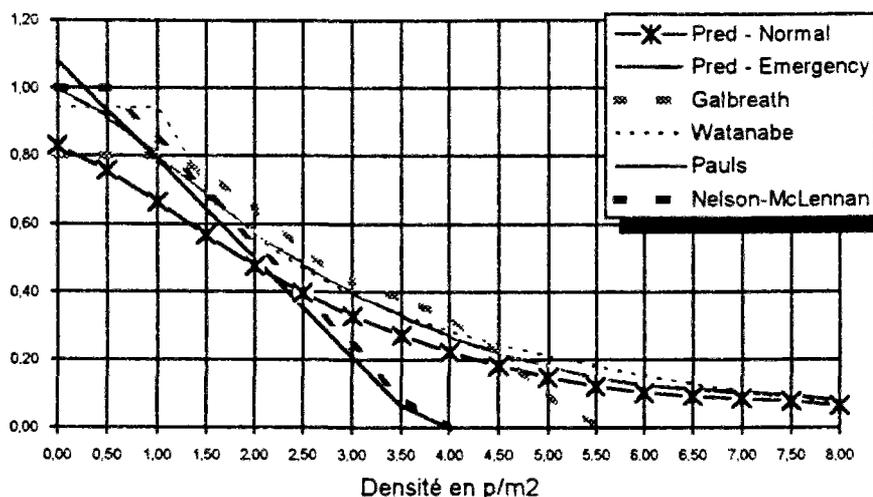


Fig. 12 - Courbes de variation de la vitesse de déplacement dans les escaliers (sens descendant) selon divers auteurs.

ESCALIERS (descendants) - Vitesse en m/s

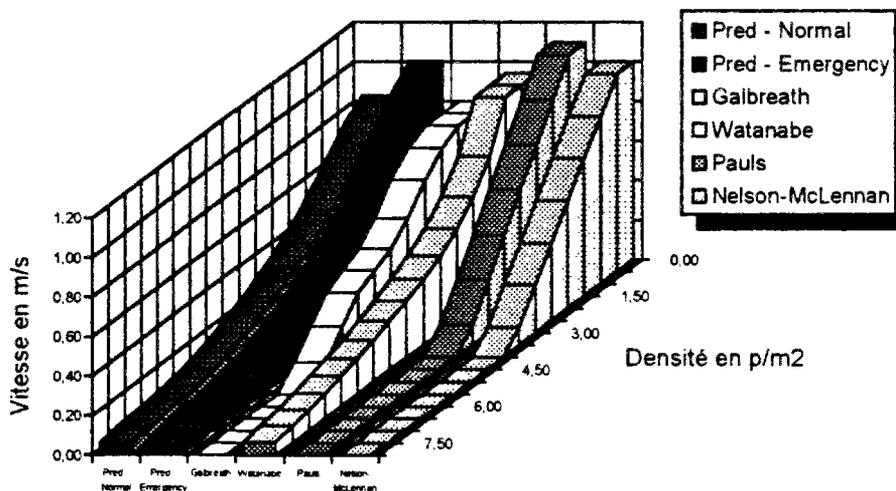


Fig. 13 - Courbes de variation de la vitesse de déplacement dans les escaliers (sens descendant) selon divers auteurs.

Formules utilisées : (v en m/s, d en p./m² sauf précisé différemment)

- Predtechenskii & Milinskii:

$$v_{normale} = 1/60 \cdot (112 d'^4 - 380 d'^3 + 434 d'^2 - 217 d' + 57) \cdot m\downarrow$$

$m\downarrow$ = coefficient de correction de la vitesse de déplacement dans un escalier dans le sens de la descente, par rapport à la vitesse du mouvement horizontal.

$$m\downarrow = 0,775 + 0,44 \cdot e^{-0,39d'} \cdot \sin(5,61 d' + 0,224) \quad (\text{unité d'angle: radian})$$

$$V_{urgence} = 1,21 \cdot v_{normale}$$

$$d' = \text{densité adimensionnelle} = f \cdot d \text{ (p./m}^2\text{)}$$

f utilisé: $f = 0,125$ mètres carrés par personne

- **Galbreath:**

Les valeurs sont extraites à partir de tableaux.

- **Watanabe**⁶⁸:

$$v = 0,8 \cdot \left(-0,26 + \left(2,39/\max\{1, d\} - 0,13 \right)^{0,5} \right)$$

- **Pauls:**

$$v = 1,09 - 0,29 \cdot d$$

- **Nelson & MacLennan:** (formule établie d'après les observations de Fruin et de Pauls)

$$v = 1,00 \quad d < 0,5 \text{ p./m}^2$$

$$v = 1,15 - 0,263 \cdot 1,15 \cdot d \quad 0,5 \text{ p./m}^2 \leq d < 3,8 \text{ p./m}^2$$

$$v = 0 \quad 3,8 \text{ p./m}^2 \leq d$$

Les sources consultées admettent que les valeurs de vitesse dans le sens ascendant sont assez proches des précédentes, malgré l'inversion de l'effet de la gravité. Celui-ci est probablement compensé par une meilleure maîtrise de la marche dans le sens ascendant pour deux raisons principales:

- lors de montée, la marche suivante est plus proche de l'oeil de la personne en mouvement,
- le corps humain possède un meilleur équilibre.

La figure 14 présente la variation du débit spécifique $q (=v \cdot d)$ découlant de ces courbes de vitesse.

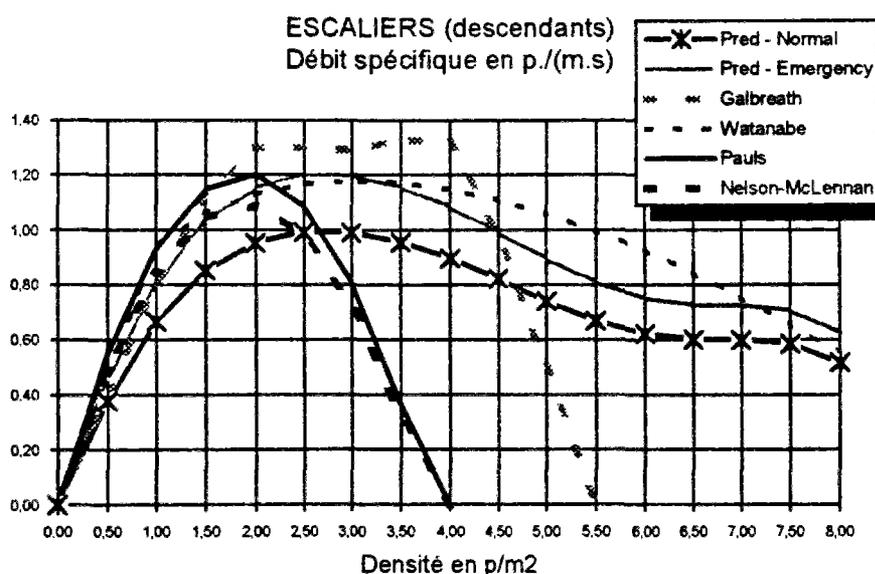


Fig. 14 - Courbes de variation du débit spécifique dans les escaliers (sens descendant) selon divers auteurs.

⁶⁸ cité dans [HORIUCHI 76]

Le tableau suivant récapitule les valeurs de capacité des escaliers rencontrées dans la bibliographie.

Capacité spécifique - escaliers ↓: descente - ↑: ascension			
Source	$p / (m\text{-sec})$	$p / (m\text{-min})$	$m^2 \text{ de } p/(m\text{-min})$
NBS (1935)↓	1,70	101	12,7
London Tr. Board(1958)↑	1,05	62	7,8
London Tr. Board(1958)↓	1,15	69	8,6
Galbreath (1969)↓	1,30	78	9,75
Predtechenskij (1969)↑	0,95 / 1,20 ⁶⁹	58 / 74	7,3 / 9,2
Predtechenskij (1969)↓	1,00 / 1,20	60 / 72	7,5 / 9,05
Fruin (1971)↓	1,05	62	7,75
Melinek (1975)↓	1,10	66	8,25
Pauls (1988)	1,09	65	8,2

II.2.4. Rampes

Tous les auteurs s'accordent pour affirmer que des rampes d'inclinaison inférieure à 10% ne provoquent pas de perturbation significative des caractéristiques cinématiques par rapport aux surfaces horizontales. Nous présentons les corrections de vitesse que proposent certains auteurs pour le déplacement ascendant sur des rampes d'inclinaison supérieure ou égale à 10%.

- Fruin⁷⁰:

$$v_{rampe}^{\uparrow}(10\%) = 0,90 v_{hor}$$

$$v_{rampe}^{\uparrow}(20\%) = 0,75 v_{hor}$$

- Melinek & Booth⁷¹:

$$v_{rampe}^{\uparrow}(x\%) = v_{hor} - (2x)\% v_{hor}$$

- Turner & Collins⁷²:

$$v_{rampe}^{\uparrow}(10\%) = 0,885 v_{hor}$$

$$v_{rampe}^{\uparrow}(20\%) = 0,75 v_{hor}$$

- Tregenza⁷³:

$$v_{rampe}^{\uparrow}(20\%) = 0,60 v_{hor}$$

⁶⁹ Les deux valeurs correspondent respectivement aux conditions d'urgence et normale. (Rappel: $f=0,125 m^2/p$)

⁷⁰ cité dans [PAULS 88]

⁷¹ [MELINEK 75]

⁷² cité dans [CROSSON 82]

⁷³ cité dans [CROSSON 82]

II.3. Présentation détaillée des principaux travaux de recherche

Nous présentons à présent de manière plus détaillée certains travaux sur le mouvement de personnes, notamment ceux ayant donné lieu à des constatations plus significatives que de simples mesures statistiques. La présentation s'efforce de suivre un ordre chronologique.

II.3.1. Togawa (1955)

1. Des observations qu'il a effectuées, Togawa⁷⁴ a déduit la formule suivante reliant la vitesse de déplacement dans une circulation horizontale et la densité d'occupation:

$$v = v_0 \cdot \min \{1, d^{-0,8}\}$$

v_0 : Vitesse de déplacement à densité nulle $\approx 1,3 \text{ m} \cdot \text{s}$

d : Densité d'occupation du groupe de personnes en déplacement (personnes / m^2)

On en déduit pour le débit:

$$q = v \cdot d = v_0 \cdot d^{0,2}$$

q : Débit unitaire en nombre de personnes par mètre de largeur et par seconde

2. Pour les escaliers, Togawa propose une formule de calcul indépendante de la densité, de la distance horizontale parcourue et du sens du mouvement (ascendant ou descendant), mais fonction du seul dénivelé entre 2 étages:

$$t = 4 \cdot H \quad (H \text{ en mètres, } t \text{ en secondes})$$

Exemple: $H=3 \text{ mètres} \Rightarrow t=12 \text{ secondes}$.

Ceci revient à retenir une vitesse verticale de déplacement constante: $0,25 \text{ m} / \text{s}$.

3. Togawa a également proposé une formule empirique de calcul du *temps net d'évacuation* d'un bâtiment:

$$T = \frac{N}{b' \cdot q} + \frac{l_{max}}{v}$$

⁷⁴ Togawa K., Report No.14, Building Research Institute, Tokyo, 1985
cité dans [PAULS 88]

où:

T = Temps net d'évacuation, en secondes

N = Population du bâtiment

b' = Largeur de la restriction la plus étroite sur le cheminement d'évacuation, en mètres

q = Débit unitaire dans la restriction, en nb personnes par mètre de largeur et par seconde

l_{max} = Distance depuis la "tête" de la foule à la sortie, en mètres

v = Vitesse de déplacement de la "tête", en mètres par seconde. ($v \approx 1 \text{ m/s}$)

Cette formule s'efforce de combiner deux composantes intuitivement fondamentales du temps net d'évacuation, retenues par de nombreux auteurs⁷⁵ pour analyser le temps nécessaire pour évacuer:

1. Un temps nécessaire au déplacement jusqu'à la sortie en conditions de densité nulle.
2. Un "temps de congestion", nécessaire au franchissement des goulots d'étranglement le long du parcours d'évacuation en conditions de déplacement dense.

D'un point de vue théorique, une telle décomposition n'est pas tout à fait correcte, car dans un mouvement réel, il est rare que l'une ou l'autre des composantes se manifeste à l'état "pur". D'habitude elles se confondent en un mouvement de vitesse variable, inférieure à la vitesse libre de déplacement. Ainsi, rien ne semble justifier l'usage de l'addition pour combiner ces termes.

Signalons en passant que Togawa ne retient que la restriction la plus étroite, en adoptant l'hypothèse classique que c'est celle-ci qui pilote et conditionne les phénomènes de formation de bouchons.

Il est difficile d'évaluer globalement l'efficacité de cette formule empirique. Il est seulement possible de dire qu'elle présente une tendance à fournir des résultats optimistes, puisqu'elle suppose que l'évacuation se déroule à débit maximal dans la restriction la plus étroite, ce qui n'est pas souvent le cas comme le confirment les travaux présentés au sous-chapitre suivant.

⁷⁵ [PAULS 88], [NELSON 88]

11.3.2. Predtechenskii - Milinskii (1969)

Le programme expérimental le plus ambitieux dans le domaine des mouvements de personnes fut entrepris en plusieurs phases en ex-Union Soviétique durant la période 1937- 1966. Ce programme a abouti à l'ouvrage "*Planning for Foot Traffic Flow in Buildings*" (traduit en anglais en 1979 par les soins du National Bureau of Standards), qui se veut à la fois une synthèse des résultats de ces observations, un guide de conception des circulations pour piétons, mais qui comporte également une proposition de méthode de calcul manuel très complète du mouvement des personnes évacuant un bâtiment.

La proposition de Predtechenskii et al. est fort intéressante à de nombreux égards et présente en premier lieu l'avantage de se fonder sur une base expérimentale apparemment aussi fiable qu'impressionnante: plusieurs milliers d'observations, dont de nombreuses filmées, qui ont été menées par des équipes différentes de chercheurs, dans des instituts différents, et ce sur une période de trente ans.

Lois empiriques découlant des observations

Les auteurs fournissent une description très détaillée des grandeurs cinématiques en fonction de la densité d'occupation, et du type de site où le mouvement a lieu: couloir, restriction (passage de porte,...), escalier ascendant et descendant. Ils distinguent également trois types de mouvement: *confortable*, *normal* et *urgent*. Une originalité intéressante de leur travail réside dans la définition de la densité qu'ils utilisent pour tenir compte, non seulement du nombre de personnes, mais également des différences de taille inhérentes à l'âge, le sexe, les vêtements (hiver/été), la corpulence,... Au lieu de la définition classique de la densité, les auteurs introduisent une densité adimensionnée:

$$d' = \frac{\text{Somme des aires des projections au sol des individus}}{\text{Surface totale}} \quad (\text{sans dimension} = \frac{\text{m}^2 \text{ de personnes}}{\text{m}^2 \text{ de surface}})$$

Il s'agit en quelque sorte d'un pourcentage d'occupation de la surface au sol par la population, indépendamment de la "section" des individus. L'utilisation pratique de cette grandeur a nécessité une campagne de mesures anthropométriques permettant de quantifier la surface de la projection verticale d'un individu f . L'ordre de grandeur pour un adulte est de 0,1 à 0,125 m². Rappelons que, si f est la surface projetée

moyenne d'un occupant (m^2 /personne), la relation entre la densité classique et la densité adimensionnelle est la suivante:

$$d' = f \cdot d$$

(d' sans dimension, d en personnes/ m^2 , f en m^2 /personnes)

L'utilisation de cette grandeur permet déjà d'appréhender un ordre de grandeur de la densité maximale théorique: celle-ci doit correspondre à une densité d' proche de 1 (100% de la surface est occupée), c'est à dire à environ 8 adultes en habits d'hiver ou 10 adultes en vêtements d'été. Les auteurs indiquent que dans la réalité la densité adimensionnelle dépasse rarement la valeur de 0,92, ce qui correspond déjà à un degré de compression relativement élevé de la foule.

$$d'_{max} = 0,92 \quad m^2 \text{ de personnes} / m^2$$

Au-delà de ce seuil, aucune considération sur les caractéristiques du mouvement n'a de sens, puisque les occupants sont pratiquement immobilisés. Si la densité vient à augmenter davantage et avoisine la valeur de 1, il y a risque d'accident à cause de la forte compression de la foule: suffocations, déplacements incontrôlés, chutes, etc. Les auteurs signalent qu'il est possible, dans des conditions extrêmes de compression, d'observer des dépassements de la limite théorique de densité de 1 m^2 de personnes par m^2 ,...

Les lois empiriques établies par Predtechenskii et al, reliant la vitesse de déplacement du groupe de personnes à densité uniforme⁷⁶ à la densité adimensionnelle sont les suivantes:

Circulations horizontales: (les vitesses sont en m/s)

$$V_{normale} = 1/60 \cdot (112 d'^4 - 380 d'^3 + 434 d'^2 - 217 d' + 57)$$

$$V_{confortable} = (0,63 + 0,25 d') \cdot v_{normale}$$

$$V_{urgence} = (1,49 - 0,36 d') \cdot v_{normale}$$

Issues:

$$V_{normale} = 1/60 \cdot (112 d'^4 - 380 d'^3 + 434 d'^2 - 217 d' + 57) \cdot m_0$$

m_0 = coefficient de correction de la vitesse de déplacement dans une issue, par rapport à la vitesse du mouvement horizontal.

$$m_0 = 1,17 + 0,13 \cdot \sin(6,03 d' - 0,12) \quad (\text{unité d'angle: radian})$$

⁷⁶ Rappelons à ce propos les points 3 et 4 du paragraphe II.1 de ce chapitre.

$$v_{\text{confortable}} = (0,63 + 0,25 d') \cdot v_{\text{normale}}$$

$$v_{\text{urgence}} = (1,49 - 0,36 d') \cdot v_{\text{normale}}$$

Escaliers en descente:

$$v_{\text{normale}} = 1/60 \cdot (112 d'^4 - 380 d'^3 + 434 d'^2 - 217 d' + 57) \cdot m\downarrow$$

$m\downarrow$ = coefficient de correction de la vitesse de déplacement dans un escalier dans le sens de la descente, par rapport à la vitesse du mouvement horizontal.

$$m\downarrow = 0,775 + 0,44 \cdot e^{-0,39d'} \cdot \sin(5,61 d' + 0,224) \text{ (unité d'angle: radian)}$$

$$v_{\text{confortable}} = 0,76 \cdot v_{\text{normale}}$$

$$v_{\text{urgence}} = 1,21 \cdot v_{\text{normale}}$$

Escaliers en montée:

$$v_{\text{normale}} = 1/60 \cdot (112 d'^4 - 380 d'^3 + 434 d'^2 - 217 d' + 57) \cdot m\uparrow$$

$m\uparrow$ = coefficient de correction de la vitesse de déplacement dans un escalier dans le sens de la montée, par rapport à la vitesse du mouvement horizontal.

$$m\uparrow = 0,785 + 0,09 \cdot e^{-3,45d'} \cdot \sin(15,7 \cdot d') \quad d' \leq 0,6$$

$$m\uparrow = 0,785 - 0,10 \cdot \sin(7,85 \cdot d' + 1,57) \quad d' \geq 0,6$$

$$v_{\text{confortable}} = 0,76 \cdot v_{\text{normale}}$$

$$v_{\text{urgence}} = 1,21 \cdot v_{\text{normale}}$$

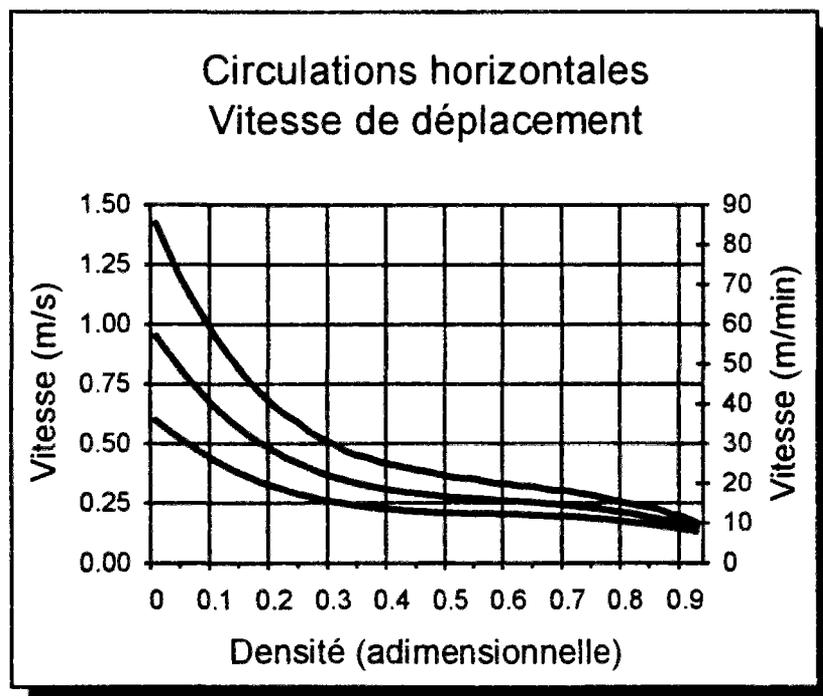


Fig. 15 - Courbes vitesse-densité pour trois allures de déplacement: confortable, normal, d'urgence

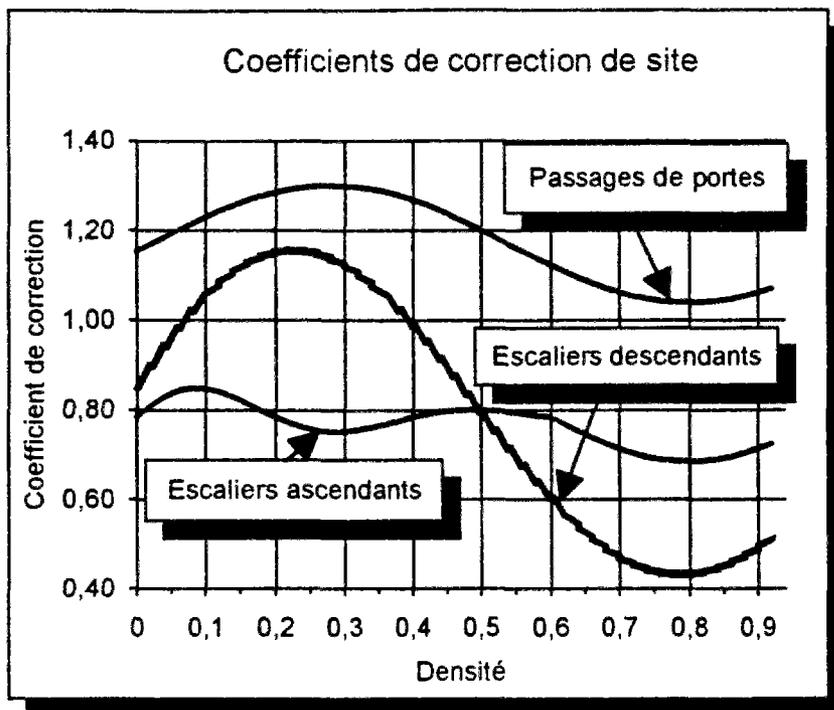


Fig. 16 - Variation des coefficients de correction en fonction de la densité

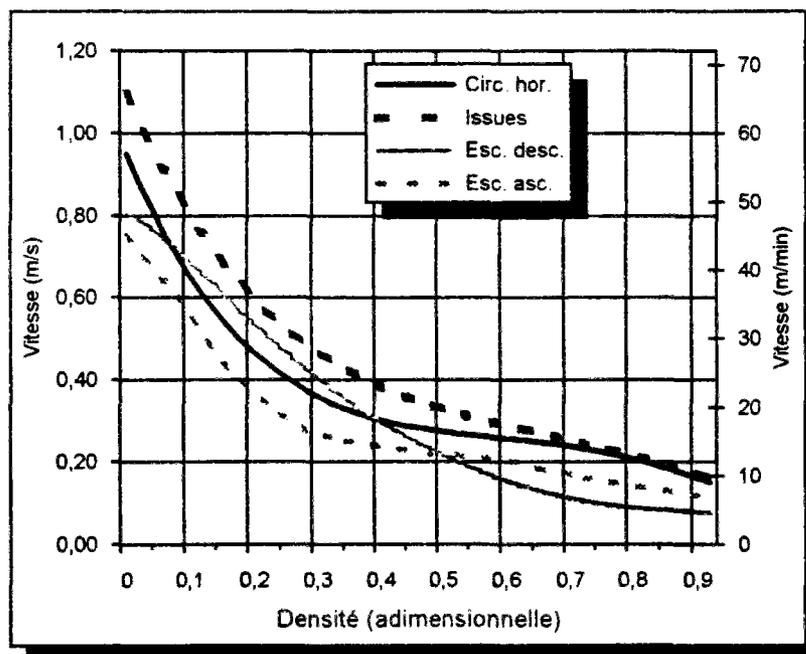
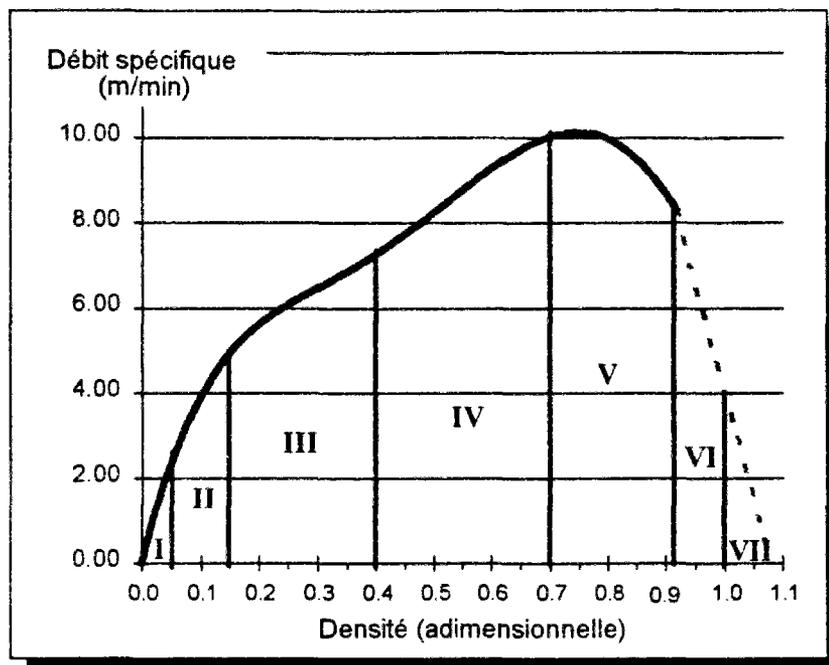


Fig. 17 - Courbes vitesse-densité selon la configuration où le mouvement a lieu - Mouvement normal

La courbe du débit spécifique⁷⁷ (débit spécifique = vitesse • densité) découlant de la vitesse normale de déplacement dans une circulation horizontale est la suivante:



*Fig. 18 - Variation du débit en fonction de la densité -
circulation horizontale - Mouvement normal*

A partir de cette courbe les auteurs procèdent à une classification qualitative du mouvement en fonction de la densité. Ils distinguent au total sept plages de mouvement, allant du déplacement libre, jusqu'à la zone de compression avec danger d'accident (plage VII sur la figure précédente).

La figure suivante présente les courbes de débit spécifique pour tous les cas de configuration.

⁷⁷ Les auteurs préfèrent parler d'intensité de mouvement.

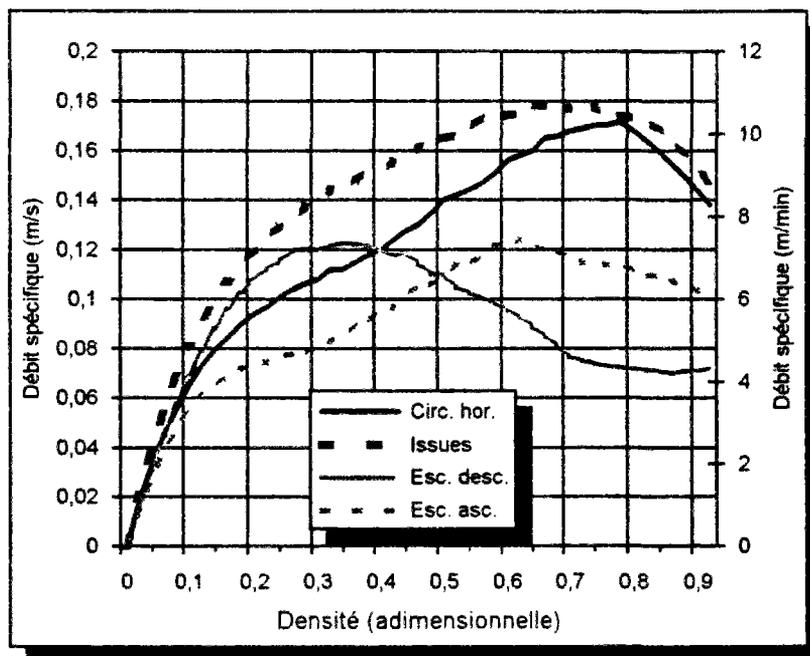


Fig. 19 - Courbes débit spécifique-densité selon la configuration où le mouvement a lieu - Mouvement normal

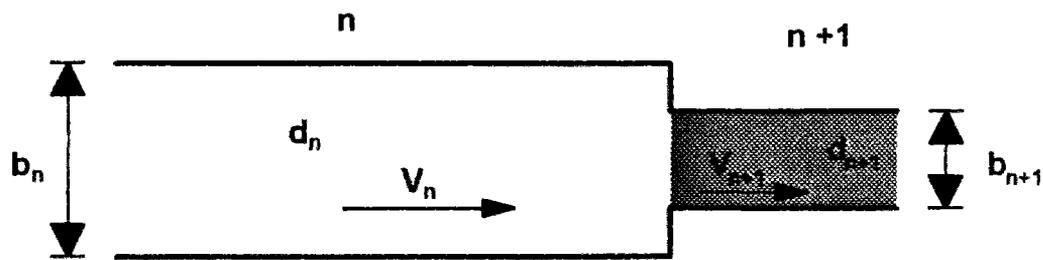
Méthode de calcul

Armés de ces lois empiriques, Predtechenskii et al ont émis certaines hypothèses de travail, et en recourant à l'application systématique du principe de la conservation de la "masse" (en l'occurrence les occupants), ont développé une méthode de calcul suffisamment complète pour pouvoir être considérée comme un modèle de déplacement de personnes à part. Cette méthode de calcul décrit finement la plupart des phénomènes inhérents au mouvement de foule: variation de la densité le long d'un flux de personnes, confluence, formation de retenues en amont des restrictions, détente après le passage, propagation d'ondes similaires à celles du trafic routier⁷⁸,...

Rappelons les deux principes de base de la méthode:

1. A chaque changement de la configuration du mouvement -confluence, divergence, changement de largeur, passage d'une circulation horizontale à un escalier- il faut qu'il y ait conservation des débits de part et d'autre de l'interface. La figure suivante illustre cette situation.

⁷⁸ L'onde de choc est ici mentionnée au sens général et non seulement comme une décélération remontant un flot en déplacement. L'accélération de la partie avant du "paquet", qui se propage progressivement à tout le flot constitue également une onde de choc. En l'occurrence, l'onde de choc est matérialisée par l'interface entre deux flots à densités différentes.



Formules de base:

Conservation des débits: $Q_{n-1} = Q_n \Leftrightarrow$

$$q_{n+1} \cdot b_{n+1} = q_n \cdot b_n \Rightarrow$$

$$q_{n+1} = \frac{q_n \cdot b_n}{b_{n+1}}$$

(Rappel: $q = v \cdot d$)

Application numérique:

Rappelons également que q et v sont lus sur des tables (ou des diagrammes) en fonction de la densité. Utilisons les courbes correspondant au mouvement normal:

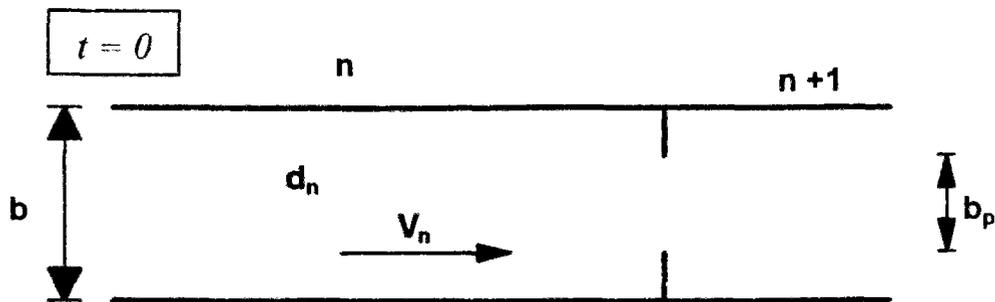
$$\left\{ \begin{array}{l} d_n = 0,15 \\ b_n = 2m \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} v_n = 33 \text{ m/min} \\ q_n = 4,95 \text{ m}^2/\text{min} \end{array} \right. \Rightarrow Q_n = 9,9 \text{ m}^2/\text{min}$$

$$b_{n+1} = 1m \Rightarrow q_{n+1} = 9,9 \text{ m}^2/\text{min} \leq q_{\max} = 10,13 \text{ m}^2/\text{min}$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} d_{n+1} = 0,68 \\ v_{n+1} = 14,6 \text{ m/min} \end{array} \right.$$

Le débit est conservé mais la densité passe de 0,15 à 0,7 et la vitesse chute de 33 m/min à 14,6 m/min.

2. Si le débit amont dépasse la capacité aval ou la capacité de l'interface même, alors il y a formation d'une zone (grandissante si l'alimentation de l'interface est soutenue) de retenue en amont de l'interface, qui atteint quasi-instantanément la densité maximale (0,92). Cette augmentation brutale de la densité provoque une chute importante du débit à l'interface et amplifie le phénomène d'embouteillage. La conservation de la masse veut que ce débit diminué se retrouve en aval de l'interface. En d'autres termes, alors qu'il y a embouteillage, l'élément aval de circulation peut paradoxalement fonctionner à un débit inférieur à sa capacité. C'est ce que les auteurs appellent l'*expansion* du flot de circulation. L'exemple suivant illustre une telle situation.



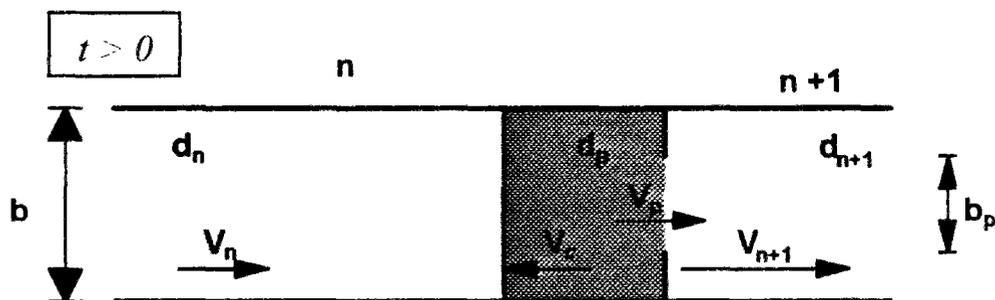
Application numérique:

A l'instant $t=0$ nous avons:

$$\left\{ \begin{array}{l} d_n = 0,7 \\ b_n = 3m \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} v_n = 14,31 \text{ m/min} \\ q_n = 10,02 \text{ m}^3/\text{min} \end{array} \right. \Rightarrow Q_n = 30,06 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$b_p = 1,5m \Rightarrow q_p = 20,04 \text{ m}^3/\text{min} > q_{\max} = 10,59 \text{ m}^3/\text{min} \text{ (pour les issues)}$$

Le débit amont dépassant la capacité de la porte, nous avons immédiatement apparition d'une zone croissante à densité maximale. Quelques instants après 0, la situation peut ressembler à celle-ci:



Sur le schéma ci-dessus, v_c représente la vitesse de déplacement de l'interface, ou pour reprendre l'analogie du trafic routier, la vitesse (opposée à celle du mouvement) de propagation de l'onde de choc due au bouchon. Le débit dans l'issue s'effectue à densité maximale (les indices p se réfèrent à la porte):

$$\left\{ \begin{array}{l} d_p = 0,92 \\ b_p = 1,5m \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} v_p = 9,85 \text{ m/min} \\ q_p = 9,06 \text{ m}^3/\text{min} \end{array} \right. \Rightarrow Q_p = 13,6 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$b_{n+1} = 3m \Rightarrow q_{n+1} = 4,53 \text{ m}^3/\text{min} < q_{\max} = 10,13 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} d_{n+1} = 0,13 \\ v_{n+1} = 35,3 \text{ m/min} \end{array} \right.$$

Ce phénomène que décrivent les auteurs, et dont nous ne sommes malheureusement pas en mesure de confirmer l'existence, n'est pas sans importance, car il confère une

"instabilité" au modèle: dès que le débit tend légèrement à dépasser la capacité d'un élément de circulation, nous avons chute brutale de celui-ci, certes d'ampleur relativement faible (d'environ 15 à 20%), et apparition d'une onde de choc remontant le flot de la foule. Pratiquement, cela signifie également que la notion de capacité maximale d'une circulation n'a pas beaucoup de sens, puisque si l'on tend vers celle-ci, on risque de se retrouver rapidement à une valeur inférieure de débit. Cela signifie aussi que toute la zone de densité au-delà du débit spécifique maximal est une zone instable, qui ne peut théoriquement être observée qu'à des instants transitoires.

Prenons un exemple extrême pour illustrer cette instabilité. Soit un couloir avec une densité de 0,75 correspondant au débit spécifique maximal $q = q_{max} = 10,13 \text{ m/min}$. La moindre restriction dans le sens de la marche, aussi petite soit-elle, entraînera théoriquement un dépassement immédiat de la capacité du couloir, et par conséquent une retenue de densité 0,92, ainsi qu'une chute du débit à 8,35 m/min, soit une diminution de 18%.

Il est à noter que la méthode de calcul de Predtechenskii et al. nécessite une quantité importante de calculs fastidieux dès que le problème implique plus d'un flot initial d'évacuants.

Conclusion

En définitive, les travaux des Soviétiques paraissent très riches, tant en informations expérimentales que par le caractère détaillé de la méthode de calcul proposée. Ce n'est pas un hasard si celle-ci a trouvé de nombreuses applications, notamment en Europe et en France. Ces travaux ont servi de base aux codes de calcul développés à l'Union Technique Interprofessionnelle de la Fédération Française du Bâtiment au début des années 1980⁷⁹. La méthode de calcul a également bénéficié d'adaptations ou d'exploitation informatique de la part d'Anne-Marie Majou au CSTB⁸⁰, de Ezel Kendik⁸¹ en Autriche, et de Rita Fahy⁸² à la National Fire Protection Association des Etats-Unis pour le traitement du cas des bâtiments de grande hauteur. Très récemment, elle a fait l'objet d'une nouvelle informatisation, dans le cadre du logiciel Agora développé par Emmanuel Lardeux⁸³.

⁷⁹ "Etude de l'évacuation du public - Application à un centre commercial" [SARRAT]

⁸⁰ "Modèle simplifié de calcul de l'évacuation, par utilisation des escaliers, de bâtiments à plusieurs niveaux" [MAJOU 85]

⁸¹ "Designing Escape Routes in Buildings" [KENDIK 86], voir aussi § II.3.8. et § III.11

⁸² "EXIT89: An Evacuation Model for High-Rise Buildings" [FAHY 91], voir aussi § III.11

⁸³ "La modélisation des mouvements de foule" [LARDEUX 92], voir aussi § III.12

11.3.3. Galbreath (1969)

Galbreath⁸⁴ s'est intéressé au problème particulier de l'évacuation des immeubles de grande hauteur. Il a notamment observé une dizaine d'exercices d'évacuation de bâtiments au Canada. A partir de ces observations et en les recoupant avec les données bibliographiques existantes, notamment les résultats du London Transport Board, il a proposé un tableau de variation de la vitesse dans les escaliers en fonction de la densité⁸⁵.

Ce travail a finalement abouti à la proposition d'une formule simplifiée de calcul du temps net d'évacuation d'un immeuble de grande hauteur, reproduite dans ce qui suit telle quelle:

$$T = \frac{N + n}{r \times u}$$

où:

T = Temps nécessaire à l'évacuation complète par les escaliers

N = Nombre de personnes au - dessus du 1^{er} niveau

$n = \min \left\{ \begin{array}{l} \text{Occupation par étage} \\ \text{Capacité en personnes du tronçon de la cage d'escalier} \\ \text{entre deux étages à une densité de 3,6 personnes / m}^2 \end{array} \right\}$

r = Débit d'évacuation en personnes par unités de passage - r est lu dans un tableau en fonction de la densité retenue lors de la détermination de n

u = Nombre d'unités de passage de la cage d'escalier (1 UP = 22 pouces = 0,56 m)

Cette formule suppose que les évacués du rez-de-chaussée et du premier niveau n'interfèrent pas avec les flux d'évacuation en provenance des autres étages.

En comparant avec la formule proposée par Togawa, nous constatons que:

1. Galbreath néglige le temps nécessaire au déplacement (la distance n'apparaît pas) par rapport au temps correspondant à des phénomènes de congestion,

2. par contre, cette fois-ci, une tentative est faite d'introduire un débit dépendant de la densité.

⁸⁴ "Time of Evacuation by Stairs in High Buildings" [GALBREATH 69]

⁸⁵ Voir courbes de la présentation synthétique § 11.2.

Malgré cette amélioration, les temps d'évacuation prédits à l'aide de cette formule présentent des écarts importants avec les temps que l'auteur a observé: la sous-estimation est systématique, dépassant parfois 50%⁸⁶.

A partir de ses calculs et observations, Galbreath soulève le problème de l'évacuation de bâtiments de très grande hauteur pour lesquels une évacuation complète pourrait nécessiter plus d'une demi-heure, voire plus d'une heure. Il en conclut, entre autres, qu'il est nécessaire de s'interroger sur la possibilité d'utilisation organisée des ascenseurs en pareille situation.

11.3.4. Peschl (1971)

Peschl⁸⁷ est à l'origine de l'analogie granulaire déjà présentée dans ce mémoire. Il a été conduit à cette analogie suite à ses observations qui ont porté sur les conditions de formation des arches. Ses expériences ont permis de conclure que l'apparition de celles-ci dépendait essentiellement de la combinaison de trois éléments:

1. la densité
2. la largeur de l'issue,
3. la forme des bords de l'issue.

Les expériences réalisées ont consisté à demander à un groupe d'individus de franchir une porte le plus rapidement, et en exerçant une aussi grande pression que possible. L'influence de la largeur de la porte a notamment été étudiée. Les résultats sont les suivants (b = largeur de la porte):

- b = 1,20 m: formations-ruptures d'arches
- b = 0,86 m: arches très stables, passage très difficile
- b = 0,60 m: arches quasiment indestructibles (débit $Q \approx 0$)

Les données numériques recueillies par Peschl lors de ses expérimentations lui ont permis de conclure que la fréquence d'apparition des arches est inversement proportionnelle au carré de la largeur de l'issue.

Peschl a également montré qu'en lissant les angles de la restriction suivant une courbe exponentielle, on obtenait une vitesse d'écoulement trois fois supérieure.

⁸⁶ Un tableau comparatif comportant quelques exemples de calcul de temps d'évacuation est proposé à la fin du sous-chapitre 11.3.7, consacré aux travaux de Pauls.

⁸⁷ Peschl I., "Doorstromingscapaciteit van deuropeningen bij panieksituaties (Passage Capacity of Door Openings in Panic Situations)", p.62-67, Bouw, Vol 28, No. 2, 9, 1971
cité dans [CROSSON 82]

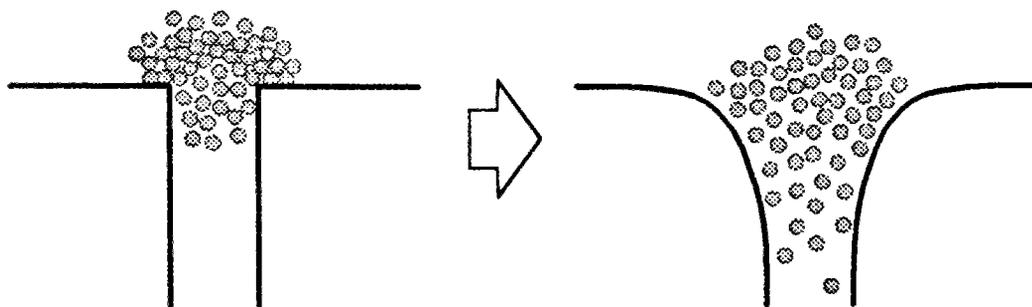


Fig. 20 - Expérience de Peschl: augmentation de la vitesse dans le passage de porte en lissant les angles.

Enfin, les expérimentations ont confirmé que, lorsqu'il n'y a pas d'instabilités dues à la formation d'arches, le débit est fonction linéaire de la largeur de la porte.

II.3.5. Fruin (1971)

Fruin⁸⁸ a été sur le continent américain un des pionniers de l'étude du mouvement de personnes. Il a notamment transposé au mouvement piéton, des concepts utilisés par les américains pour la description des niveaux de congestion du trafic routier.

L'occasion est offerte de présenter plus généralement les similitudes que présentent le mouvement des piétons et le trafic routier: nous retrouvons notamment dans les deux cas les mêmes formes de courbes de variation de la vitesse et du débit en fonction de la densité. Dès 1934, l'étude des conditions d'écoulement du trafic routier de certaines catégories de voies de circulation avait permis à Greenshields⁸⁹ d'établir une première loi empirique du second degré en d :

$$Q = v_0 \cdot d - \frac{v_0}{d_{max}} \cdot d^2$$

Q : débit en nombre de véhicules par heure

v_0 : vitesse à densité nulle = 74 km/h

d : densité en nombre de véhicules par kilomètre

d_{max} : densité maximale observée = 122 véhicules/km

⁸⁸ "Pedestrian Planning and Design" [FRUIN 71]

⁸⁹ Greenshields B.D., "A Study of Highway Capacity", Highway Research Board Proceedings, Vol.14, 1934
cité dans [ΦΡΑΝΤΖΕΣΚΑΚΗΣ 82]

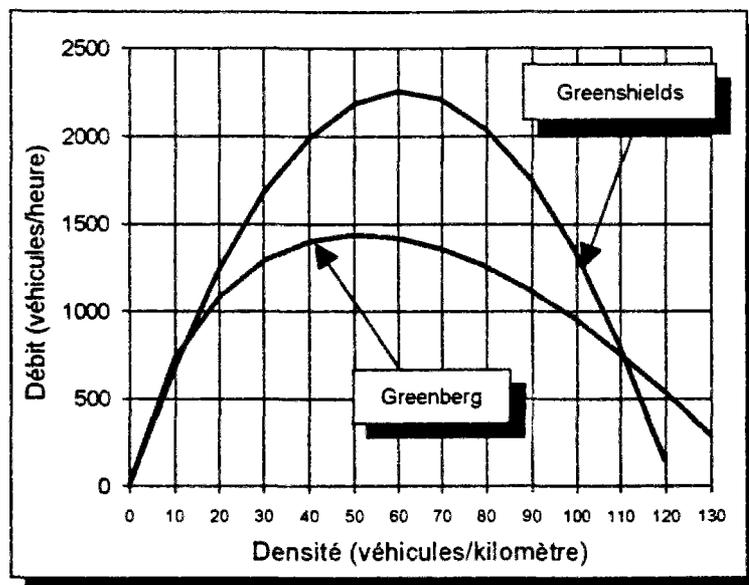


Fig. 21 - Lois empiriques débit - densité pour le trafic routier

En 1958, Greenberg⁹⁰ proposait: $Q = 27,7 \cdot d \cdot \ln(141 / d)$.

Nous remarquons la ressemblance avec les courbes de débit spécifique du mouvement piéton.

Plus tard fut introduit le concept de *niveau de service*⁹¹ ("level of service") d'une voie de circulation, grandeur exprimée sur une échelle de 6 lettres, de A pour la situation la plus fluide, à F pour la saturation absolue. Cette grandeur a été introduite lorsqu'apparut la nécessité de décrire autrement qu'à l'aide d'une simple capacité, les exigences fonctionnelles lors de la conception d'éléments du réseau routier. Ceci permet d'ajouter un descripteur qualitatif et de spécifier, par exemple, que la capacité requise doit être réalisée en niveau de service A, c'est à dire avec un écoulement très fluide. Chaque *niveau de service* correspond en réalité à une certaine plage de densités de circulation.

C'est ce concept de *niveau de service* que Fruin a étendu au mouvement piéton en définissant de manière parfaitement similaire 6 niveaux, notés de A à F. Comme pour le trafic routier, le niveau F correspond à des densités de saturation, c'est à dire plus élevées que la densité correspondant à la capacité de la voie; le niveau E correspond à la région de fonctionnement autour de ce débit maximal. Et comme pour le trafic

⁹⁰ Greenberg H., "A Mathematical Analysis of Traffic Flow. Tunnel Traffic Capacity Study", The Port of New York Authority, New York, 1958
cité dans [ΦΡΑΝΤΖΕΣΚΑΚΗΣ 82]

⁹¹ "Highway Capacity Manual 1965", Highway Research Board, Special Report 87, Washington D.C., 1965
cité dans [ΦΡΑΝΤΖΕΣΚΑΚΗΣ 82]

routier, il n'est conseillé de concevoir une voie de circulation en niveau E qu'en cas de problèmes importants de disponibilité d'espace, le niveau F étant bien sûr à proscrire car il entraîne une compression importante de la foule et une liberté de mouvement quasiment nulle, conditions pouvant être à l'origine d'accidents de foule. La décomposition de Fruin en niveaux de service est finalement assez proche de la caractérisation du mouvement de foule par classement en 7 catégories de densité proposée par Predtechenskii et al. (voir §II.3.2.).

Fruin a également observé certains éléments intéressants relativement au mouvement piéton:

- Le port de bagages a peu d'influence sur la vitesse de déplacement d'une personne.
- Dans un couloir avec deux flots à contre-courant, si la densité n'est pas très élevée, le débit total n'est que légèrement inférieur au débit correspondant à l'usage du couloir dans un seul sens.
- Par contre, dans une cage d'escalier avec deux flots à contre-courant, le débit total est nettement diminué: il suffit que quelques personnes essaient de se déplacer en sens inverse dans une cage d'escalier pour que le débit total soit réduit de moitié.
- Fruin a également mis au point une expérience intéressante destinée à explorer la possibilité d'obtenir expérimentalement des débits spécifiques d'évacuation plus élevés que les valeurs traditionnellement admises ($1,5 \div 2 \text{ personnes/m.s}$ - voir §II.2.1.). Il est ainsi parvenu à obtenir des débits de 4 personnes/m.s en faisant marcher les évacuants en file, chaque individu tenant par les épaules celui qui le devance.

Enfin, Fruin a introduit la notion de *module piéton*: est ainsi désigné l'espace dont dispose chaque occupant. Cette notion recouvre aussi bien un aspect quantitatif (le module étant bien sûr l'inverse de la densité), qu'un aspect psychologique, dans le sens des distances minimales que "culturellement" un individu cherche à établir par rapport à ses voisins. Fruin a notamment constaté l'agencement spontané des individus de manière à toujours essayer de préserver cet espace individuel.

11.3.6. Melinek & Booth (1975)

Melinek et Booth ont poursuivi l'étude du problème de l'évacuation des immeubles de grande hauteur (IGH) entamée par Galbreath.

Leurs observations ont tout d'abord amené à quelques constatations d'ordre général:

- Les angles et virages ont peu d'effet sur les débits et la vitesse moyenne: la densité augmente et la vitesse diminue près de la corde, les variations étant inverses vers l'extérieur du virage.
- L'âge et le sexe, ou la disparité des capacités physiques de la population ne sont pas déterminants pour les aspects cinématiques en configuration dense: la vitesse de déplacement dans une telle configuration est uniforme, et est celle qu'impose le "paquet" d'évacuants environnant. Ceci n'est plus valable quand la densité est faible.

Cette dernière constatation est confirmée par le fait que les courbes de vitesses que proposent Predtechenskii et Milinskii selon l'allure du déplacement (confortable, normal, d'urgence) se resserrent pour les densités élevées.

Pour finir, les auteurs proposent une nouvelle formule empirique, dans la lignée de celles de Togawa et Galbreath, que nous reproduisons ici.

Il est supposé que les occupants du rez-de-chaussée n'entravent pas l'évacuation des occupants en étage, et qu'initialement, tous les occupants de chaque niveau se trouvent près de l'entrée de la cage d'escalier.

Soit:

- N_r = Nombre d'occupants au niveau r .
- b_r = Largeur de l'escalier entre les niveaux $r-1$ et r .
- Q' = Débit spécifique des escaliers dans le sens de la descente.
- t_s = Temps nécessaire pour descendre d'un niveau en mouvement libre.
 \approx ici 16 secondes.
- n = Nombre de niveaux.

Nous avons alors:

Population des niveaux r et supérieurs=

$$\sum_{i=r}^n N_i$$

Temps minimum pour que les occupants des niveaux r et supérieurs se retrouvent au niveau $r-1$ =

$$\frac{\sum_{i=r}^n N_i}{Q' \cdot b_{r-1}}$$

Temps pour que la queue de la foule atteigne le rez-de-chaussée en conditions de congestion nulle=

$$r \cdot t_s$$

Temps minimal d'évacuation des niveaux r et supérieurs=

$$T_r = \frac{\sum_{i=r}^n N_i}{Q' \cdot b_{r-1}} + r \cdot t_s$$

Alors, le temps net d'évacuation est défini comme suit:

Temps net d'évacuation	=	$\max\{T_r\}, \quad r = 1, n$
------------------------	---	-------------------------------

Dans le cas particulier où tous les étages sont identiques ($N_i=N, b_i=b$), nous avons:

$$T_r = (n - r + 1) \frac{N}{Q' \cdot b} + r \cdot t_s$$

Deux cas de figure sont à distinguer:

- Le dernier occupant d'un niveau pénètre dans la cage d'escalier *avant* que le premier occupant de l'étage supérieur ne soit descendu d'un étage

$$\Leftrightarrow N / (Q' \cdot b) < t_s$$

Nous n'avons alors aucune interférence et aucun mélange des flots d'évacuation en provenance de chaque étage. T_r est alors maximum pour $r = n$:

$T = T_n = \frac{N}{Q' \cdot b} + n \cdot t_s$
--

- Le dernier occupant d'un niveau pénètre dans la cage d'escalier *après* que le premier occupant de l'étage supérieur est descendu d'un étage:

$$\Leftrightarrow N / (Q' \cdot b) \geq t_s$$

T_r est alors maximum pour $r = 1$:

$T = T_1 = n \cdot \frac{N}{Q' \cdot b} + t_s$
--

Remarquons que l'on retrouve dans la proposition de Melinek et Booth les deux composantes du temps net d'évacuation qui figuraient dans la formule de Togawa: un temps de déplacement sans contrainte, et un temps de congestion. Les auteurs ont comparé les prédictions obtenues à l'aide de cette formule avec les temps d'évacuation qu'avait observé Galbreath, ainsi que les résultats de deux autres exercices d'évacuation⁹². Bien que meilleures que celles de Galbreath, les prédictions de Melinek et Booth sous-estiment encore trop souvent, et de manière importante le temps réel d'évacuation.

11.3.7. Pauls (1974 - 1980)

Pauls⁹³ est un spécialiste de l'évacuation des IGH, ayant organisé une trentaine d'observations d'évacuations d'immeubles de bureaux de grande hauteur de 8 à 21 étages. Une constatation majeure de ses travaux concerne la largeur à laquelle doit être rapporté le débit spécifique. Pauls a en effet observé que le débit dans les cages d'escalier variait linéairement non pas avec la largeur totale de la circulation, mais avec celle obtenue après déduction de 0,30 m de celle-ci. Cette constatation, un peu hâtivement baptisé "modèle de la largeur effective", s'explique par un effet de "couche limite" que Fruin et Predtechenskii et al. ont également observé: les occupants se déplacent en respectant une bande d'environ 15 centimètres par rapport aux parois latérales. Cette constatation implique une importante restriction du débit pour des circulations étroites, et remet en cause la notion d'Unité de Passage. Il est cependant à noter que dans la réglementation française, une Unité de Passage (UP) unique correspond à 0,90 m, 2 UP à 1,40 m et n UP à n X 0,60 m pour n supérieur à 2. Bien qu'étudiée seulement dans le cas des escaliers, Pauls⁹⁴ suggère d'étendre aux circulations horizontales la notion de largeur effective.

D'autre part, l'expérience des exercices d'évacuation a amené Pauls à insister sur l'importance des problèmes d'organisation particuliers aux bâtiments de taille importante (alarme, communication,...), et qui entraînent un risque de sous-estimation systématique du temps total nécessaire à l'évacuation.

⁹² Un extrait de ces résultats figure au tableau comparatif proposé à la fin du sous-chapitre II.3.7. consacré aux travaux de Pauls.

⁹³ [PAULS 80], [PAULS 82], [PAULS 84], [PAULS 87], [PAULS 88]

⁹⁴ [PAULS 88]

Pour ce qui concerne la relation vitesse-densité, Pauls propose une simple formule linéaire⁹⁵:

$$v = 1,09 - 0,29 \cdot d$$

A partir de ses observations, Pauls dégage une formule totalement empirique (au sens où il n'existe pas de modèle sous-jacent) étonnamment simple, et qui permet selon l'auteur, non pas simplement le calcul du temps net d'évacuation, mais directement celui du temps total:

$$\begin{aligned} & \bullet p < 800 \begin{cases} T = 0,68 + 0,081 p^{0,73} \\ \text{ou, sous forme linéaire: } T = 2 + 0,0117 p \end{cases} \\ & \bullet p \geq 800 : T = 0,7 + 0,0133 p \end{aligned}$$

Avec:

T = Temps total d'évacuation en minutes

p = Nombre total d'occupants rapporté à la largeur effective totale des escaliers

Comparaison des formules de Galbreath, Melinek et Pauls

Dans le tableau qui suit nous avons appliqué la formule de Pauls aux bâtiments dont l'évacuation avait été observée par Galbreath, et qui avaient été repris par Melinek et al. Les valeurs correspondant aux formules de Galbreath et Melinek sont celles fournies par les auteurs.

Bâtiments à plusieurs niveaux - Comparaison des temps d'évacuation observés et prédits à l'aide des formules simplifiées				
No. d'observation	Temps observé (min)	Temps prédits (min)		
		Galbreath ⁹⁶	Melinek ⁹⁷	Pauls ⁹⁸
1	4,5	2,1	1,8	3,0
2	5	2,1	2,8	4,3
3	4,5	3,6	4,3	5,9
4	5,5	6	6,9	9,1
5	6,5	6,7	8,6	10,6
6	7,5	5,8	7,8	9,8
7	9	4,3	5,8	7,7
8	4	1,8	3,4	4,7
9	7,5	5,2	6,8	12,2

⁹⁵ Voir présentation synthétique § II.2.

⁹⁶ [GALBREATH 69]

⁹⁷ [MELINEK 75]

⁹⁸ Valeurs obtenues par application de la formule de Pauls.

Sur la figure suivante nous avons porté l'erreur relative sur le temps d'évacuation pour chacun des 9 bâtiments selon la formule employée.

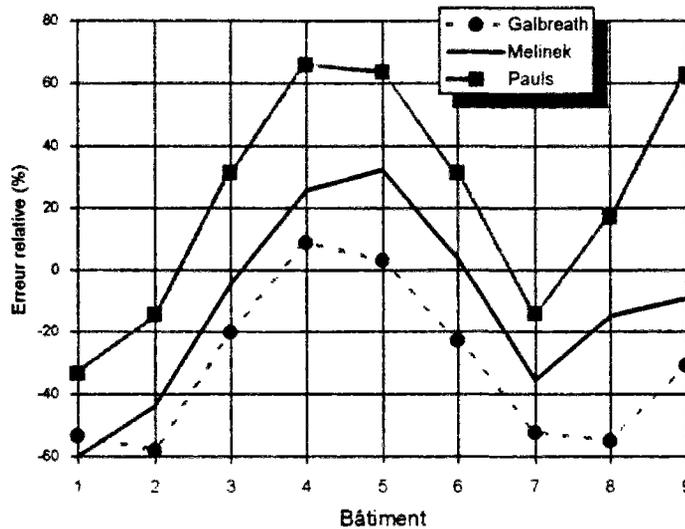


Fig. 22 - Erreur relative obtenue avec chacune des trois approches.

Nous remarquons sur cette figure que chacune des trois approches est susceptible de fournir sur certains exemples des résultats comportant une erreur importante. Notons seulement que, sur cet échantillon réduit, la formule de Melinek semble fournir des valeurs légèrement plus correctes.

Il est également intéressant de tracer sur une figure le temps d'évacuation en fonction de la grandeur p retenue par Pauls comme unique variable [Fig. 23].

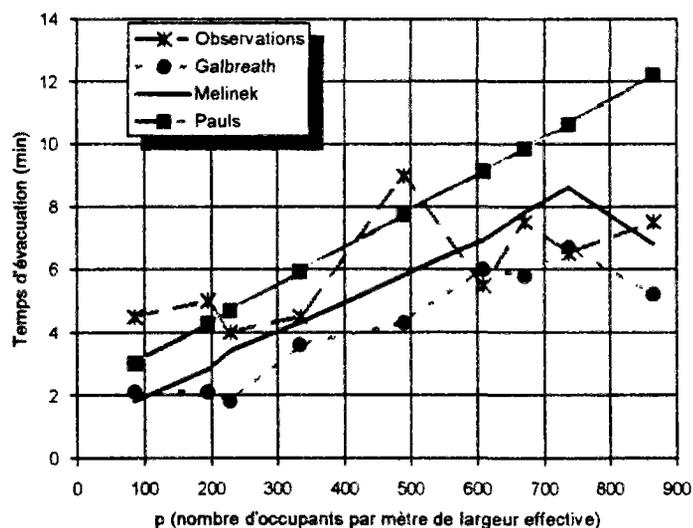


Fig. 23 - Temps d'évacuation observé et calculé en fonction du nombre d'occupants par largeur totale effective des escaliers.

Nous remarquons que le temps *observé* d'évacuation ne varie pas linéairement avec p (le nombre d'occupants par mètre de largeur effective des escaliers), ce qui semble confirmer que cette variable ne suffit pas à caractériser le problème de l'évacuation d'un bâtiment.

II.3.8. Kendik (1985)

Kendik⁹⁹ a entrepris d'étudier expérimentalement la validité de la méthode de calcul de Predtechenskii et al.

La première étape de son travail a consisté à mener des mesures anthropométriques sur un échantillon de 600 personnes en vue de la quantification de l'aire de la projection au sol d'une personne f , qui constitue une grandeur fondamentale de la méthode russe. Les résultats ont révélé un écart significatif par rapport aux valeurs préconisées par la méthode de Predtechenskii et al: alors que l'ordre de grandeur de f que proposent ces derniers pour un adulte est de 0,1 à 0,125 m² par personne (suivant l'habillement), les observations de Kendik ont fourni une valeur moyenne de 0,192 m² pour une personne normalement habillée.

Une deuxième phase fut consacrée à l'observation d'exercices d'évacuation de trois bâtiments. Les données recueillies ont servi à analyser la validité de la méthode russe, en étudiant notamment l'influence de la valeur f introduite. Paradoxalement, les résultats prédits furent très proches des temps observés, mais seulement si la méthode était appliquée avec les valeurs de f préconisées par les auteurs...

Les travaux de Kendik ont abouti à une version informatisée de la méthode de calcul russe.

II.4. Les accidents de foule

Avant de clore cette présentation des travaux d'étude du mouvement de foule, il est nécessaire d'évoquer brièvement le problème des accidents de foule.

⁹⁹ [KENDIK 85], [KENDIK 86]

Rappelons tout d'abord que ce problème se pose indépendamment de la présence d'un incendie, ou d'une quelconque autre menace. Le phénomène semble apparaître dès qu'une foule non seulement dense, mais également importante dans l'absolu (plusieurs dizaines de personnes) et non seulement par rapport à l'espace disponible, se trouve impliquée dans un déplacement caractérisé par une saturation totale, générant des temps d'attente longs. Un élément important et fréquemment observé dans les accidents de foule est la mauvaise communication entre la tête et la queue de la foule: très souvent la queue ne voit pas et ne comprend pas ce qui se passe devant, et continue d'exercer une pression intenable. Il est nécessaire d'ajouter que ces accidents sont beaucoup plus probables là où des comportements humains agressifs, voire violents sont exacerbés (l'accident est plus probable à la sortie d'un stade, qu'après un dîner de gala).

La gravité des accidents est étroitement liée au nombre élevé de personnes, celui-ci constituant l'explication des pressions extraordinaires développées en pareille situation. Selon Fruin¹⁰⁰ des "ondes de choc" peuvent provoquer des déplacements incontrôlés de masses importantes d'individus de plus de 3 mètres; les gens perdent leurs chaussures, leurs vêtements sont déchirés. Le risque physiologique majeur est l'asphyxie, et dans une moindre mesure l'écrasement, la chute et/ou le piétinement. La chute peut non seulement constituer la conséquence d'une pression élevée, mais également être un facteur déclencheur d'accident généralisé.

Le fait que ces accidents soient indépendants de la présence d'une menace explicite rend en définitive plus facile la mise en oeuvre de dispositions visant à diminuer la probabilité de tels accidents. Diverses solutions efficaces ont été proposées, la clé du problème résidant en la séparation des flots de déplacement en petits groupes ou canaux d'évacuation, de manière à empêcher le développement de pressions importantes. Complémentairement, il est nécessaire que les voies soient de capacité suffisante, et un effort doit être entrepris, lors de la conception de sites à risque, d'utilisation de rampes de faible inclinaison au lieu d'escaliers.

¹⁰⁰Ventre F.T., Stahl F.I. & Turner G.E., "Crowd Ingress to Places of Assembly: Summary and Proceedings of an Expert's Workshop, May 1981", National Bureau of Standards
cité par [Pauls 88]

II.5. Synthèse

En guise de synthèse pour conclure ce sous-chapitre consacré à un rapide passage en revue des études du mouvement de foule, nous retenons les éléments majeurs suivants:

- L'observation du mouvement de foule a conduit à une analyse macroscopique de celui-ci (au sens où seules les valeurs moyennes ont un sens) proche de l'analogie hydraulique.
- La vitesse de déplacement est reliée à la densité d'occupation. Plusieurs lois sont proposées par les observateurs.
- La variation linéaire du débit avec la largeur de la circulation semble établie.
- Certains auteurs proposent des formules empiriques de calcul du temps d'évacuation. Les résultats obtenus à l'aide de ces formules sont assez médiocres.
- Predtechenskii & Milinskii ont fourni, à la fois, les données statistiques les plus complètes, mais également un modèle puissant, aboutissant à une méthode de calcul manuelle fondée essentiellement sur un principe de conservation, en l'occurrence du nombre total de personnes en mouvement.



III. LES MODELES ET CODES DE CALCUL EXISTANTS

Préambule à la présentation des modèles

Dans cette dernière partie du deuxième chapitre nous présentons les modèles et codes de calcul du mouvement de personnes développés ces quinze dernières années.

L'étude bibliographique des codes de calcul existants a révélé un volume de travaux impressionnant, et une diversité insoupçonnée d'approches développées pour la modélisation et la simulation du mouvement de personnes et de l'évacuation de bâtiments. La variété des caractéristiques de ces travaux est telle qu'un classement est difficile à établir. Voici quelques-uns des critères selon lesquels ces propositions pourraient être triées:

- L'intégration d'aspects comportementaux.
- La prise en compte du feu. Avec quel degré de détail (blocage, enfumage, ruine) et quels effets sur l'évacuation (changement de trajet, du comportement,...)?
- La reproduction des phénomènes de congestion et de variation de la vitesse en fonction de l'encombrement.
- Le mode de représentation de l'environnement architectural.
- La modélisation d'occupants à mobilité réduite et des actions d'assistance.
- Le suivi macroscopique ou microscopique des occupants (ce critère de classement a été introduit par Emmanuel Lardeux - voir également § III.12).
- Les techniques de simulation employées: stochastique, déterministe, événementielle,...

Nous pouvons cependant d'ores et déjà fournir quelques éléments susceptibles de favoriser une meilleure compréhension, lors de l'examen détaillé de chaque approche:

1. Les approches intégrant des aspects comportementaux exigent impérativement un suivi microscopique des individus, les règles de comportement étant personnalisées et dépendant de *l'histoire* précise de chaque occupant.

2. Il en va de même pour les modèles modélisant des individus à mobilité réduite et ayant besoin d'assistance.

3. Les deux aspects précédents vont souvent de pair avec des techniques de simulation probabilistes.

4. A l'opposé, la prise en compte de phénomènes de variation de la vitesse dus à la densité d'occupation implique souvent le recours à des modèles macroscopiques, assimilant les occupants à un fluide, de manière à pouvoir exploiter les données statistiques macroscopiques disponibles. Ces modèles sont souvent déterministes.

5. La prise en compte d'effets du feu sur l'évacuation est rare.

6. La modélisation géométrique s'appuie dans la quasi totalité des cas sur une représentation par réseau de noeuds, d'habitude "*ponctuels*", mais aussi parfois "*rectilignes*". Par ces termes nous entendons:

- *noeud ponctuel*: aucune modélisation n'est faite du mouvement à l'intérieur du noeud,

- *noeud rectiligne*: le noeud possède une largeur et une longueur, mais le mouvement est décrit exclusivement dans le sens de l'un des deux axes de l'élément de circulation modélisé.

Au tableau suivant, on peut trouver une comparaison des diverses caractéristiques des modèles passés en revue.

Le constat sur la richesse des approches existantes doit être nuancé après étude plus approfondie des caractéristiques et principes de modélisation de chaque approche. Peu de modèles sont véritablement fonctionnels, nombre d'entre eux n'ont fait l'objet que d'une seule communication et semblent avoir été abandonnés et pour très peu d'entre eux une étude de validation a été entreprise.

Dans la suite de ce chapitre nous présentons donc, dans un ordre chronologique, les approches que nous avons rencontrées dans la littérature. Il est à noter que nous n'avons pris connaissance de certains de ces travaux que très récemment, étant donné que leur développement a eu lieu au moment où se préparait cette thèse.

Les codes de calcul basés sur la méthode de Predtechenskii et Milinskii, exposée au sous-chapitre précédent, présentent certaines ressemblances entre eux, tout au moins dans leurs caractéristiques théoriques. Par conséquent, nous ne présentons ici qu'un seul d'entre eux, EXIT89 (parmi les plus récents), et nous nous contentons de mentionner les autres dans la partie de ce sous-chapitre consacrée à EXIT89.

La proposition de modèle d'évacuation intégrée dans la thèse de Teresa Ling¹⁰¹ ne figure pas ici étant donné qu'elle est tout à fait équivalente à EVACNET (selon Ling même) qui est le premier modèle que nous présentons ici.

¹⁰¹ [LING 82]

Tableau Comparatif des Caractéristiques des Modèles d'Evacuation

MODELE	Microscopique / Macroscopique	Probabiliste / Déterministe / Stochastique	Technique de simulation	Géométrie	Encombrements	Vitesse des occupants	Personnes avec besoin d'assistance	Personnel d'assistance	Aspects comportementaux	Feu
EVACNET (1979-86)	M	D	Programmation linéaire	Réseau	Oui (par interruptions)	Pas de vitesse (Temps de traversée de chaque arc)	Non	Non	Non	Non
BFRES (1979-82)	μ	P	Pas de temps	Maillage	Oui (par interruptions)	Constante & Uniforme	Oui (dédiés à des occ précis)	Oui	Instinct grégaire, éloignement du danger, assistance, hésitation	Oui (Eloignement du feu et des fumées-Simul. d'enfumage)
EMBER (1982)	μ	D	Pas de temps	Réseau	Oui (par variation de la vitesse)	Variable (fonction de la densité)	Oui	Oui	Assistance au déplacement	Oui (Modèle simplifié de feu et de mouvement de fumées)
MCGREGOR SMITH (1982)	M	DS	Algorithme MVA	Réseau de files d'attente	Oui (par interruptions)	Pas de vitesse (Temps de service dans chaque file)	Non	Non	Non	Non
ERM (1983-85)	μ	D	Pas de temps	Réseau	Non	Constante (dépend de l'occ de 0,15 à 1,5 m/s)	Oui	Oui	Assistance (à la préparation et/ou au déplacement)	Non
FEES / MB (1985)	μ	P	Pas de temps	Arborescence d'évacuation continue	Non	Constante & Uniforme	Oui (seulement d'être alertés)	Oui (pour alerter)	Alerter	Non
KENDIK / MAJOU (1985)	M	D	Pas de temps	Réseau d'éléments rectilignes	Oui (variation de la vitesse + capacités)	Variable (fonction de la densité)	Non	Non	Non	Non
TAKAHASHI - TANAKA (1987)	M	D	Pas de temps	Réseau de composants	Oui (par interruptions)	Constante & Uniforme	Non	Non	Non	Non
EXIT (1987-88)	μ	D	Pas de temps	Réseau	Non	Dépend de l'occupant et de l'enfumage (de 0,52 à 1,89 m/s)	Oui	Non (Assistance par d'autres occupants)	- Investiguer - Réveiller - Assister au déplacement	Oui (Données d'enfumage en entrée influent sur le comportement et la vitesse)
EXIT89 (1991)	μ	D	Pas de temps	Réseau	Oui (par variation de la vitesse)	Variable (fonction de la densité)	Non	Non	Non	Oui (Données d'enfumage en entrée \Rightarrow Blocages)
AGORA (90-92) / PREDTECHENSKII	M	D	Événementielle	Réseau d'éléments rectilignes	Oui (variation de la vitesse + capacités)	Variable (fonction de la densité)	Non	Non	Temps de latence	Non
AGORA / SENSIBILITE	μ	P	Événementielle	Réseau	Oui (par variation de la vitesse)	Variable (fonction de la densité)	Non	Non	Temps de latence (par variation de la densité)	Non
AGORA / FILES D'ATTENTE	M	DS	MVA modifié ou Pas de temps	Réseau	Oui (variation de la vitesse ou du débit)	Variable (fonction de la densité) pour la version MVA non standard	Non	Non	Temps de latence (changement de chemin à cause de la densité)	Non
EVACSIM (1993-?)	μ	S	Algorithme QNAP2	Réseau	Oui (variation de la vitesse + capacités)	Variable (fonction de la densité)	Non	Non	Temps de latence	Non

III.1. Evacnet (1979-86)

EVACNET¹⁰² (EVACNET+ dans sa version finale) a été développé au National Bureau of Standards (actuellement National Institute of Standards and Technology) des Etats-Unis dans la période 1979-1986 par une équipe composée principalement de R.L.Francis, P.B.Saunders et T.M.Kisko.

Ce code de calcul se base sur une représentation du bâtiment sous forme de *réseau*. A chaque volume du bâtiment correspond un *noeud*. Les noeuds sont reliés entre eux par des *arcs*, ceux-ci étant censés représenter les passages entre volumes du bâtiment. A chaque noeud est associée une capacité maximale en nombre d'occupants, et à chaque arc, une capacité maximale et un temps de franchissement.

La figure 24 propose un exemple de bâtiment représenté sous la forme utilisée par EVACNET.

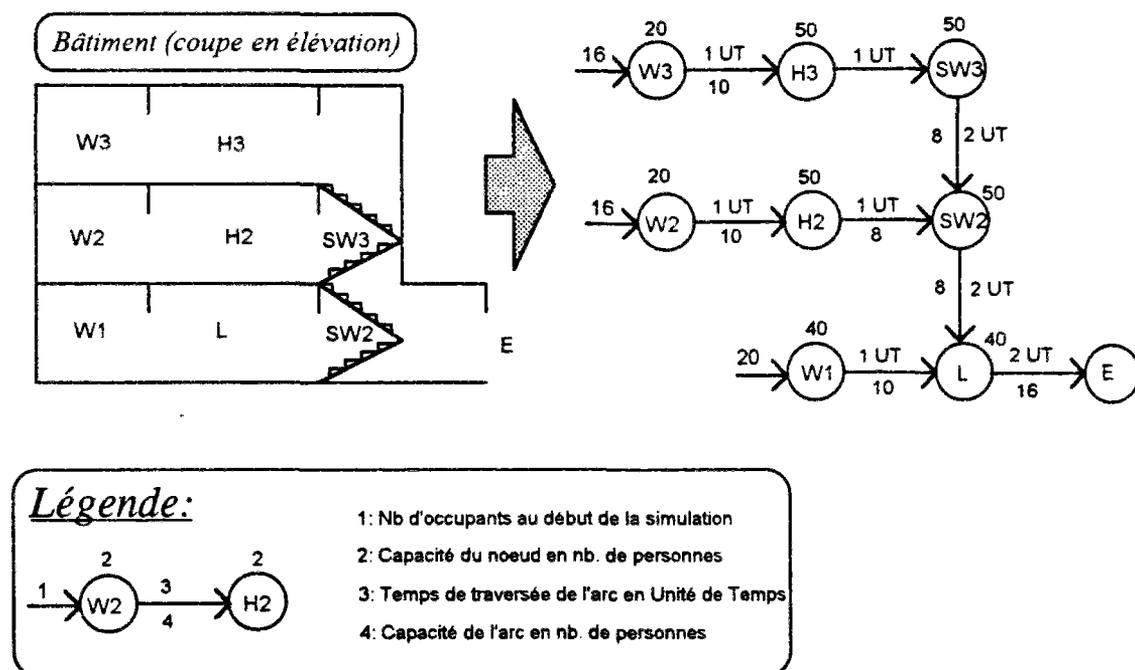


Fig. 24 - Représentation d'un bâtiment sous la forme de réseau dans EVACNET.

Cette représentation permet l'application d'un algorithme de flot maximum à coût minimal, emprunté à la théorie des graphes. En l'occurrence, dans les versions

¹⁰² [FRANCIS 79a], [FRANCIS 82], [CHALMET 82], [FRANCIS 84a], [FRANCIS 85], [FRANCIS 86]

initiales, il s'agissait de l'algorithme Maxflow développé par Ford et Fulkerson¹⁰³, puis de Gnet¹⁰⁴. La fonction de *coût global* adoptée est la suivante:

- A chaque personne évacuant est associé un coût égal au pas de temps d'évacuation de la personne. Pour reprendre l'image des auteurs, un tourniquet fictif installé aux issues incrémente la fonction coût à chaque sortie d'occupant de la valeur du pas de temps au moment de cette sortie.

Si le bâtiment abrite initialement n occupants, soit $To(i)$ le pas de temps de sortie de l'occupant i , le coût global s'écrit alors:

$$\sum_{i=1,n} To(i)$$

L'algorithme minimise donc ce *coût global*, ce qui équivaut à minimiser le temps moyen d'évacuation, et non pas directement le temps médian ou le temps total d'évacuation (temps du dernier occupant). Or Jarvis et Ratliff ont montré¹⁰⁵ que la minimisation du "temps global", tel que défini ci-dessus, à l'aide de l'algorithme Maxflow entraîne simultanément:

- la minimisation du temps d'évacuation du dernier occupant, et,
- la maximisation du débit d'évacuation à chaque pas de temps.

C'est ce que les auteurs appellent "triple optimisation": temps moyen, instant d'évacuation du dernier, et débit.

A l'aide de cet algorithme qui, simultanément, identifie les chemins d'évacuation et répartit les occupants selon ceux-ci, EVACNET simule une évacuation "optimale" du bâtiment, en fournissant tous les détails utiles à l'évaluation du plan d'évacuation généré: temps global d'évacuation, temps moyen, débits d'évacuation à chaque pas de temps, utilisation des noeuds et arcs...

Rappelons les hypothèses retenues dans les premières versions d'EVACNET:

1. La durée de traversée des arcs est constante. Elle ne dépend pas de la densité d'occupation de l'arc.
2. Le feu et la fumée ne sont pas modélisés.

¹⁰³ Ford L.R. & Fulkerson D.R., "Flows in Networks", Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1962
cité dans [CHALMET 82]

¹⁰⁴ Bradley G.H., Brown G.G. & Graves G.W., "Design and Implementation of Large-Scale Primal Transportation Algorithms", Management Science, Vol.24, pp.1-34, 1977
cité dans [CHALMET 82]

¹⁰⁵ Jarvis J.J. & Ratliff H.D., "Some Equivalent Objectives for Dynamic Network Flow Problems", Management and Science, Vol.28, No.1, 1982
cité dans [CHALMET 82]

3. Les comportements humains ne sont pas pris en considération.
4. Le plan d'évacuation généré ne constitue que l'une des solutions optimales correspondant aux données introduites, les autres solutions pouvant être très différentes.

Les auteurs présentent EVACNET comme un outil permettant d'établir une performance ("*benchmark*" en anglais) du bâtiment, ce que l'on pourrait définir comme un "*indice d'évacuabilité*".

Quelques réserves peuvent être émises quant à certaines des hypothèses de base d'EVACNET. L'absence de modélisation du feu et du comportement humain ne saurait constituer une lacune très critiquable, étant donné la complexité du sujet; telle approche a tendance à mieux représenter le mouvement des personnes, telle autre le comportement, et rares sont les modèles couplant le feu et les personnes. La faiblesse majeure du modèle provient de l'introduction de la part de l'utilisateur d'un temps de passage, *a priori*, pour les arcs du réseau. Ceci signifie, en termes simples, que le déplacement des occupants s'effectue à *vitesse constante*. Les effets de congestion et de variation de la vitesse en fonction de la densité ne sont introduits qu'au moyen de la capacité maximale des arcs et des noeuds, avec, pour effet, d'induire des temps d'attente avant l'entrée de l'occupant dans l'élément de réseau suivant. Une fois introduit dans l'arc, l'occupant se déplace à une vitesse qui est: constante au cours du franchissement de l'arc, constante au cours de la simulation, et prédéfinie par l'utilisateur. Ce dernier est donc contraint, en début de simulation, d'évaluer des temps de franchissement constants, alors que ceux-ci varient de manière importante dans la réalité. Mentionnons que la variation de la vitesse en fonction de l'utilisation des éléments du réseau n'est pas compatible avec les algorithmes de minimisation linéaire utilisés dans ce modèle.

D'autre part, une dissymétrie initiale importante dans l'occupation (par exemple: occupants rassemblés dans une aile de bâtiment), ou encore une dissymétrie importante dans les caractéristiques des capacités (par exemple: 2 cages d'escalier dont l'une est beaucoup plus large que l'autre), va entraîner, lors de l'usage d'EVACNET, une répartition, optimale par définition, des flots de personnes, tendant à compenser ces dissymétries initiales, l'algorithme utilisé ayant été conçu pour générer un usage maximal de toutes les voies de circulation (initialement: des voies ferrées). Or, rien ne nous permet d'évaluer le degré d'adéquation de ce résultat numérique avec la réalité, et l'on peut supposer, en tout état de cause, qu'une telle répartition

parfaitement optimale des occupants possède une très faible probabilité d'apparition lors d'une évacuation réelle.

Une dernière faiblesse qui pourrait être relevée dans EVACNET est inhérente à toutes les approches se basant sur des réseaux pour modéliser la géométrie du bâtiment: le recours aux réseaux restreint le champ d'application aux immeubles fortement compartimentés en raison de la difficulté de représenter sous cette forme des constructions comportant de grandes salles (centres commerciaux, salles de spectacles...). De surcroît, EVACNET ne repose pas sur un simple réseau, mais en fait, sur un graphe orienté. Ceci signifie qu'un arc du réseau ne peut être emprunté que dans un sens. Pour décrire un élément de circulation pouvant être emprunté dans les deux sens il faut introduire un deuxième arc à contresens. Mais, dans ce cas, les capacités dans les 2 directions, par définition constantes, sont nécessairement indépendantes entre elles.

A l'occasion de la dernière version parue d'EVACNET, EVACNET+ en 1985¹⁰⁶, les auteurs ont apporté certaines améliorations, dont la plus importante permet à l'utilisateur d'introduire des variations des caractéristiques des arcs et des noeuds dans le temps. Le problème est que ces variations ne sont pas calculées à l'intérieur du modèle, mais sont, elles aussi, prédéfinies par l'utilisateur, aussi bien pour ce qu'il s'agit de la valeur de ces caractéristiques, que pour l'instant où le changement de valeur survient.

En définitive, si EVACNET+ est utilisé pour comparer deux configurations, il est nécessaire de se rendre compte qu'il ne peut indiquer que *"si la façon la plus rapide d'évacuer l'une est plus courte ou plus longue que la façon la plus rapide d'évacuer l'autre"* [Lardeux 90a], et ce, imparfaitement, compte tenu des réserves exprimées ci-dessus.

Pour faire un usage profitable d'EVACNET+, l'utilisateur doit tenir compte des limitations du modèle. En tout état de cause, ce modèle ne devrait être utilisé que dans le cas de bâtiments fortement compartimentés, à densité d'occupation faible et ne présentant pas d'importantes dissymétries initiales. A l'autre extrême, il serait éventuellement possible de traiter également le cas de configurations présentant des densités très élevées, entraînant une occupation assez constante (proche de la saturation) des voies d'évacuation pendant une grande partie de la simulation; dans

¹⁰⁶ [FRANCIS 86]

ce cas l'utilisateur devrait introduire des valeurs de capacité et de temps de franchissement correspondant à cet état d'utilisation des éléments du réseau.

Il est à noter que les auteurs ont également proposé d'autres modèles, plus simples à mettre en oeuvre, et qui font encore une fois appel à des techniques de la recherche opérationnelle permettant de minimiser une fonction-objectif (le temps total d'évacuation) sous certaines contraintes¹⁰⁷.

Il faut enfin signaler qu'une équipe, animée par M.Kostreva¹⁰⁸, travaille ces dernières années sur les améliorations pouvant être apportées aux modèles du type EVACNET en exploitant la théorie des graphes afin de développer des algorithmes permettant d'identifier des chemins optimaux répondant à des exigences plus complexes (minimisation dynamique ou multi-critères).

III.2. BFIRES (1979-82)

BFIRES¹⁰⁹ est un modèle du comportement humain en situation d'incendie se présentant sous la forme d'un logiciel de simulation développé par un psychologue du N.B.S., Fred I. Stahl, dans la période 1979-1982. Cette approche présente deux grandes originalités:

1. Elle est l'une des rares à aspirer à reproduire certains aspects du comportement humain en situation d'évacuation.
2. Elle est la seule à adopter une description de l'environnement sous forme de quadrillage du plan.

BFIRES offre également une troisième particularité: c'est un modèle probabiliste. Les occupants se déplacent (ou non) à chaque pas de temps, d'une case du maillage à une case adjacente, selon des probabilités devant dépendre des caractéristiques de l'individu, de l'environnement, de la perception de l'environnement, et du temps.

¹⁰⁷ [CHALMET 82]

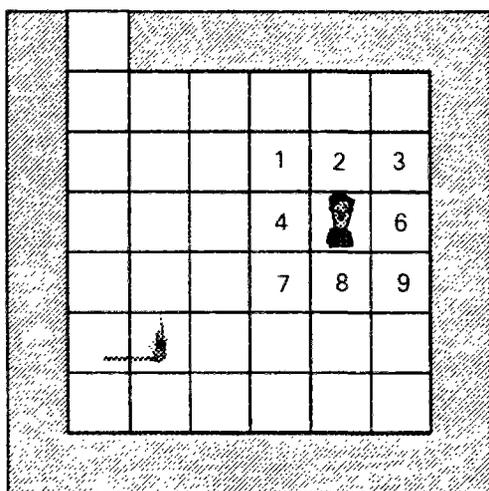
¹⁰⁸ [KOSTREVA 90], [KOSTREVA 91]

¹⁰⁹ [STAHL 79], [STAHL 80], [STAHL 82]

Principe du modèle

Les données à saisir pour décrire les occupants sont les suivantes:

- position initiale
- capacités physiques (déplacement autonome ou besoin d'assistance)
- connaissance ou non d'une issue, et, si oui, laquelle
- "tolérance aux interruptions" dans la poursuite des objectifs fixés (terme explicité plus loin)
- prédisposition à ouvrir et/ou fermer les portes rencontrées sur le chemin, celle-ci s'exprimant simplement sous la forme de probabilités constantes d'ouverture et de fermeture des portes rencontrées.



A chaque pas de temps, l'occupant du schéma ci-contre a le choix entre 9 mouvements possibles (le surplace inclus). Ce choix est probabiliste, la probabilité étant:

1. inversement proportionnelle à la distance de chacune des cases éligibles par rapport à la sortie, si l'occupant connaît l'emplacement de la sortie (\Leftrightarrow la case la plus éloignée de la sortie a la plus faible probabilité d'être choisie);
2. proportionnelle à la distance au danger, si l'occupant ne connaît pas la sortie, mais a connaissance de l'emplacement du feu (\Leftrightarrow la case la plus éloignée du feu a la plus forte probabilité d'être choisie);
3. au hasard (loi uniforme), si l'occupant ne connaît les emplacements ni du feu, ni de la sortie.

Toutes les distances sont évaluées en ligne droite (à vol d'oiseau) indépendamment de la géométrie du bâtiment (couloirs, murs, obstacles).

A ce principe de déplacement d'une case à l'autre, viennent se greffer d'autres règles, censées reproduire le comportement humain en situation d'incendie. Si, par exemple, 60% des personnes présentes à un instant donné préfèrent la même sortie, alors les 40% restants, qui préféreraient initialement une autre sortie, ou ne connaissaient pas du tout de sortie, suivent la majorité des 60%. Enfin, il est possible d'introduire une capacité maximale par case, afin de simuler les phénomènes d'encombrement, une case saturée étant, bien entendu, momentanément interdite d'accès.

Comme toute approche de modélisation dans le domaine de la psychologie, BFIRES souffre de certaines faiblesses: les essais que nous avons effectué avec BFIRES nous ont conduit à émettre quelques réserves tant pour ce qui concerne la représentation du comportement humain, que pour la modélisation du mouvement des personnes.

Discussion sur les aspects comportementaux

Pour ce qui est des aspects aspirants à la représentation du comportement humain, toute tentative de simulation à des fins d'application pratique se heurte inexorablement et systématiquement aux problèmes suivants:

- Ce qui communément est appelé "manque de données statistiques" sur le comportement humain. BFIRES offre, par exemple, la possibilité d'introduire les probabilités qu'un occupant ouvre et ferme les portes qu'il rencontre sur son chemin. Sur quelles données l'utilisateur peut-il s'appuyer pour indiquer cette probabilité?
- A supposer que ces données existent, quelle est leur fiabilité, dans quelles conditions celles-ci ont-elles été recueillies, et surtout, quelle est leur "universalité", quelle peut-être la légitimité de leur usage dans le contexte du cas étudié?

Ces quelques considérations nous rapprochent d'un débat "épistémologique" autour de la modélisation et, surtout, de la simulation du comportement humain, notamment lorsqu'il s'agit d'applications pratiques comme celle envisagée ici. Nombreux sont les avis postulant que le problème de la simulation du comportement se réduit, techniquement, à un déficit en données statistiques. Il suffirait donc de lancer, à l'échelle internationale, de vastes campagnes de collecte des informations nécessaires. Ceci permettrait, après traitement et analyse des données, de reconstituer et reproduire à volonté le comportement humain.

D'autres prétendent que le comportement humain, particulièrement en situation de danger, est bien trop complexe, pour ne pas dire chaotique, et intègre trop d'indéterminations intrinsèques pour que sa simulation puisse être pertinente à l'aide des procédés classiques. Ceux-ci reposent leurs espoirs sur des techniques plus récentes, comme celles que tente d'explorer l'Intelligence Artificielle (qui en est à ses débuts), les modèles stochastiques, la logique floue, etc... Pour reprendre l'exemple rudimentaire de la possibilité d'ouverture d'une porte de la part d'un occupant, quelle peut être en effet la pertinence de l'introduction d'une simple probabilité, alors que l'on sait très bien que cette action de la part de l'occupant ne peut, en aucun cas, être

représenté par une variable indépendante. Au contraire, mise à part une prédisposition initiale caractérisant éventuellement la personne, l'ouverture ou la fermeture d'une porte ne peut que dépendre des stimuli en provenance de l'environnement (état de développement du feu, enfumage, blocage de chemins, besoin de secourir,...), traités et filtrés par l'occupant en fonction d'autres paramètres de comportement tout aussi indéterminés et difficiles à mettre en données: connaissance des lieux, état de stress, perception du danger, besoin de se protéger,...

L'auteur de BFIREs est donc contraint d'avoir recours de manière systématique à ce qu'il reconnaît être des hypothèses d'expert. Aucune référence bibliographique ne vient, par exemple, corroborer l'établissement d'un "consensus" sur le choix d'une sortie unique si 60% des occupants sont du même avis. Il en va bien sûr de même pour la probabilité d'interruption du mouvement de l'occupant. Cette probabilité, qu'a la possibilité d'introduire l'utilisateur de BFIREs, est appliquée de la manière suivante: à chaque pas de temps, un tir aléatoire effectué pour chaque occupant détermine si celui-ci sera déplacé ou non au cours du pas de temps. Il est évident que l'usage de cette possibilité relève, par définition, de choix arbitraires et non justifiables, mais également, il est vrai, irréfutables.

Discussion sur les aspects cinématiques

La modélisation du mouvement des occupants constitue un autre point faible de BFIREs :

1. Le principe de non accessibilité des cases pour cause de saturation (dépassement de la capacité maximale) présente certains problèmes mineurs, tel qu'il est pratiquement mis en oeuvre (sensibilité importante à l'ordre de numérotation des occupants).
2. Encore une fois, aucune étude ne peut étayer l'adoption d'une loi de probabilité inversement proportionnelle à la distance à la sortie, régissant le choix de la case vers laquelle se déplace l'occupant.
3. D'autre part, l'application numérique de cette règle présente de sérieux problèmes et génère des déplacements assez peu vraisemblables.

Nous avons réalisé plusieurs simulations pour tester le fonctionnement de BFIREs et particulièrement les effets de l'usage de cette loi de probabilité. Les figures ci-après sont issues de ces simulations.

Sur le premier exemple de la figure 25, l'algorithme semble fonctionner correctement.

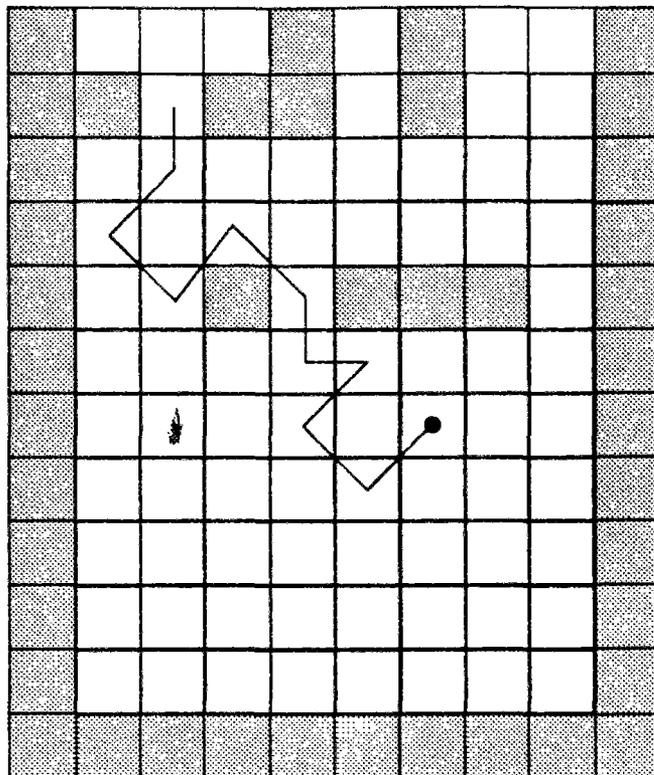


Fig. 25 - Résultat de simulation-test que nous avons effectuée avec BFIREs. Cheminement de l'occupant vers la sortie qui lui a été désignée en début de simulation.

Par contre on voit que sur l'exemple de la figure 26, les déplacements générés par l'algorithme sont beaucoup trop aléatoires.

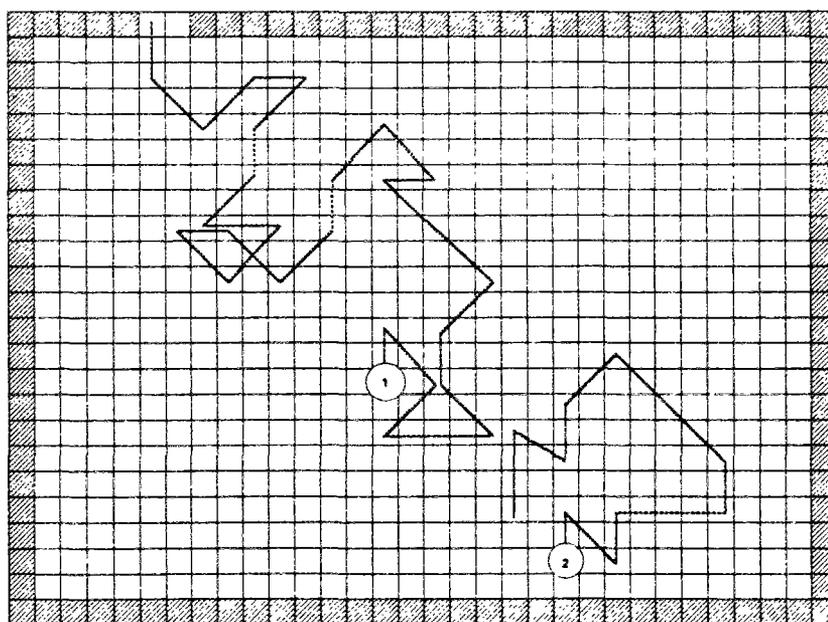


Fig. 26 - Résultat de simulation avec BFIREs. Le cheminement de l'occupant 2 vers la sortie n'est pas indiqué dans sa totalité.

L'explication de cette différence de comportement de l'algorithme est simple. Rappelons tout d'abord que la probabilité de choisir la case i parmi les 9 choix offerts à chaque occupant et à chaque pas de temps s'exprime de la manière suivante¹¹⁰:

$$P(i) = \frac{1}{l(i) \cdot \sum_{j=1,9} \frac{1}{l(j)}}$$

avec:

$P(i)$: Probabilité de choix de la case i

$l(i)$: Distance à la sortie de la case i

Plus l'occupant est éloigné de la sortie, plus les distances $l(i)$ des cases avoisinantes par rapport à la sortie sont proches entre elles en ordre de grandeur. Par conséquent les probabilités de choix de chaque case tendent à être égales quand on s'éloigne de la sortie. C'est la raison pour laquelle le mouvement "brownien" des occupants est d'autant plus marqué que l'on est éloigné de la sortie. Aussi fondée que puisse paraître l'idée que le cheminement d'un occupant est d'autant plus aléatoire que celui-ci est éloigné de la sortie, il paraît tout aussi invraisemblable que les zigzag de la figure 26 correspondent à un mouvement de personne en état de sobriété. Qui plus est, BFIREs fournit des résultats d'autant plus incohérents que le maillage est plus fin. En effet, si la taille de la maille tend vers zéro, alors les distances à la sortie depuis toutes les mailles autour de l'occupant tendent à être égales. Par conséquent, à la limite, toutes les cases deviennent équiprobables et les occupants ne trouvent jamais la sortie (sauf par hasard).

Pour quelle(s) raison(s) l'auteur a-t-il voulu recourir à cette loi de déplacement plutôt que de supposer, par exemple, qu'à chaque pas de temps l'occupant choisit la case la plus proche de son but (voir figure 27)? Plusieurs explications peuvent être avancées à ce sujet:

¹¹⁰ **Démonstration:** Nous souhaitons $\forall i: P(i) = \frac{1}{l(i)} \cdot \alpha$, avec $\alpha =$ facteur de proportionnalité tel que:

$$\sum_{j=1,9} P(j) = 1 \Leftrightarrow \sum_{j=1,9} \frac{1}{l(j)} \cdot \alpha = \alpha \cdot \sum_{j=1,9} \frac{1}{l(j)} = 1 \Rightarrow \alpha = \frac{1}{\sum_{j=1,9} \frac{1}{l(j)}} \Rightarrow \boxed{P(i) = \frac{1}{l(i) \cdot \sum_{j=1,9} \frac{1}{l(j)}}}$$

1. Tout d'abord l'auteur a voulu simuler le comportement *indécis* de l'homme placé en situation de danger.
2. Un déplacement *déterministe* annulerait pratiquement le caractère *probabiliste* du modèle.
3. La dernière raison, qui n'est peut-être pas la moins importante, est que le déplacement probabiliste permet, dans une certaine mesure, de contourner les problèmes éventuels de topologie, en particulier le blocage d'occupants par des obstacles.

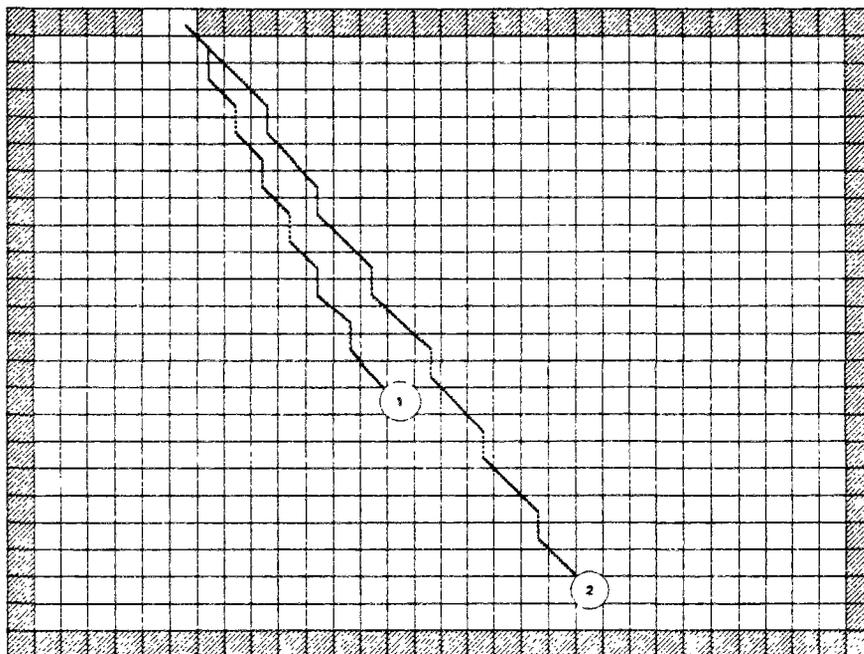


Fig. 27 - Cheminement des occupants vers la sortie avec application d'un algorithme de déplacement déterministe: à chaque pas est choisie la case la plus proche de la sortie en ligne droite.

En effet, dans les 2 exemples de la figure 28, l'application d'une loi de déplacement déterministe condamne l'occupant à l'immobilité étant donné que toutes les cases avoisinantes sont plus éloignées (en ligne droite) de la sortie que la case où il se trouve déjà. On touche là à un problème important, qui constituera un des thèmes principaux de l'apport original de cette thèse, à savoir: la reconnaissance et le contournement des obstacles. Dans BFIREs, la distance à la sortie est une distance en ligne droite, même si, par exemple, un mur sépare la case de départ de la sortie. BFIREs ne reconnaît pas les obstacles et ne peut les contourner directement. Pour réussir ce contournement, BFIREs utilise le hasard: les petits déplacements aléatoires autour de la position initiale permettent, dans certains cas, à l'occupant de se trouver par hasard sur une case depuis laquelle il peut se déplacer sans encombres ni obstacles vers la sortie.

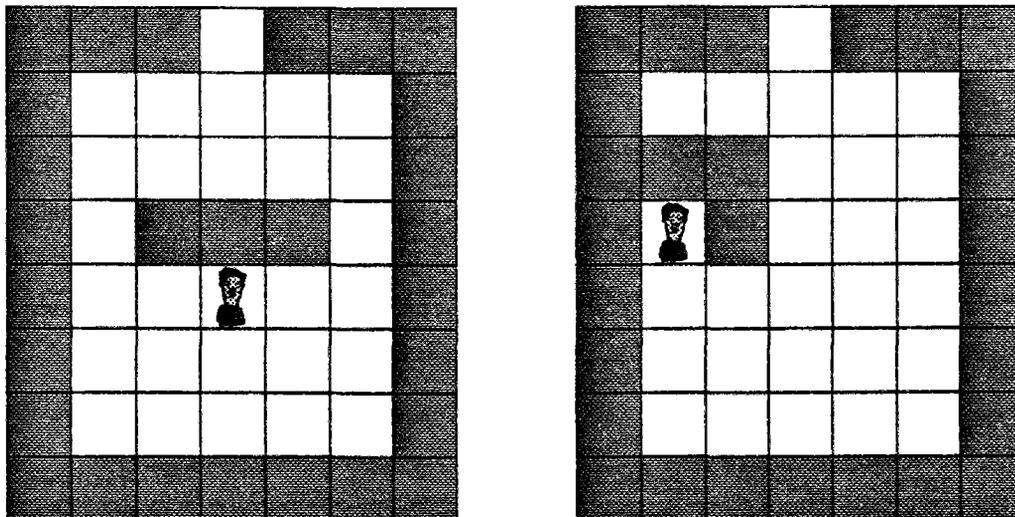


Fig. 28 - Deux cas simples où l'application de l'algorithme déterministe (choix de la case la plus proche de la sortie en ligne droite) conduit à l'immobilité de l'occupant.

Bfires II

En 1982 est apparu BFIRES/Version 2¹¹¹ qui incorpore de nouvelles fonctionnalités, notamment la prise en compte de la migration de produits toxiques et de l'intoxication, ainsi que celle de l'assistance à l'évacuation des personnes de mobilité réduite (cette dernière option était annoncée dans la Version 1 mais n'était pas opérationnelle).

La modélisation de la migration de produits toxiques est rudimentaire:

- L'état de l'enfumage est décrit au moyen d'un "flag" associé à chaque case du maillage. Une case est enfumée ou ne l'est pas du tout.
- Ni la concentration, ni la hauteur de la couche gazeuse chaude sous plafond ne sont décrites.
- la propagation de la fumée est "calculée" à l'aide d'une vitesse "concentrique" de propagation introduite arbitrairement par l'utilisateur. Le schéma ci-dessous illustre la modélisation de la propagation de la fumée.

¹¹¹ [STAHL 82]

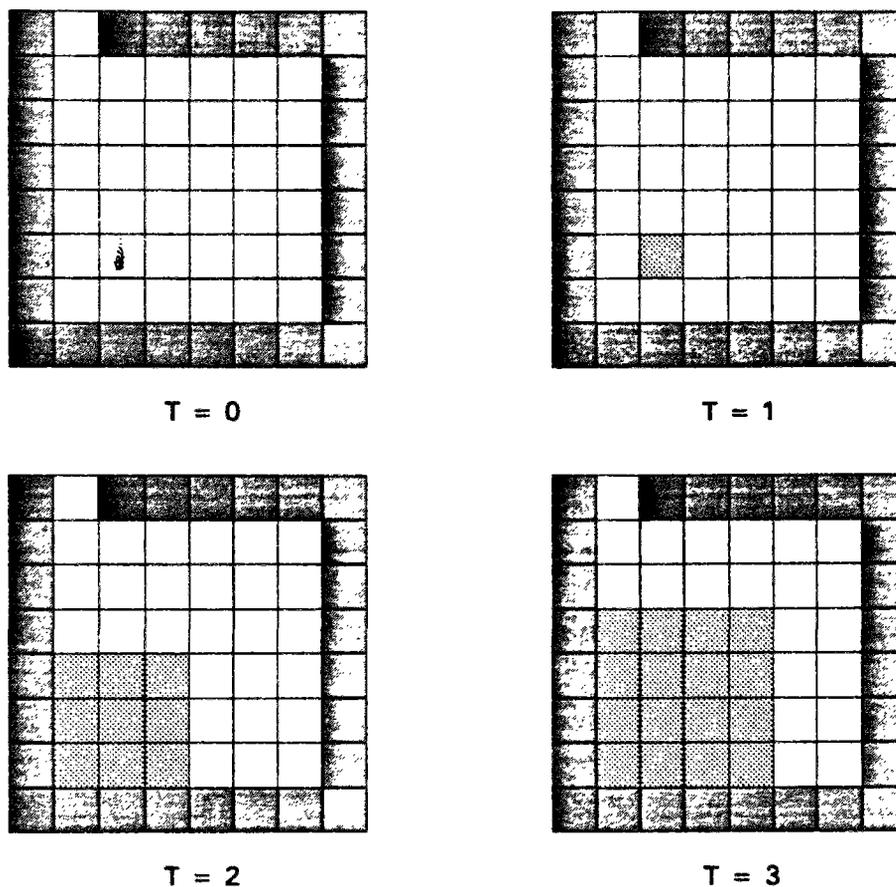


Fig. 29 - Simulation de la propagation de la fumée dans Bfires/Version 2. Vitesse introduite: 1 case par pas de temps

- La fumée s'arrête sur les obstacles, sans pour autant que ceci entraîne une propagation plus rapide dans les autres directions demeurant libres.
- L'intoxication des occupants est introduite au moyen d'un critère d'exposition aux fumées, prenant les valeurs discrètes suivantes: exposition nulle, faible ou élevée, cette dernière étant arbitrairement définie comme correspondant à une présence dans des cases enfumées pendant plus du tiers de la durée de la simulation. Non seulement le choix du pourcentage est arbitraire, mais de surcroît, l'intoxication est définie sur la base relative du temps d'évacuation et non sur un temps absolu, comme si l'exposition à des gaz toxiques pendant 30 secondes au cours d'une évacuation qui dure 1 minute au total, était plus dangereuse qu'une exposition d'un quart d'heure au cours d'une évacuation durant 1 heure.
- Enfin, l'utilisateur a la possibilité d'assigner à chaque occupant une "tolérance" aux fumées. Si cette tolérance est nulle, l'occupant ne choisira jamais une case enfumée, si au contraire celle-ci tend vers l'infini, l'occupant procédera aux choix de case comme s'il n'y avait pas de fumée. Entre les deux extrêmes, les probabilités de choisir une case, établies selon la loi

décrite précédemment, sont pondérées à l'aide de cette tolérance, afin de favoriser le choix d'une case non enfumée.

La Version 2 offre également la possibilité de simuler l'assistance à l'évacuation de personnes de mobilité réduite:

1. On peut désigner certains occupants comme assistants, et d'autre comme assistés.

2. On définit au préalable pour chaque assistant les coordonnées géométriques (x,y) d'une personne assistée. Un assistant ne peut secourir qu'une seule personne au cours d'une simulation.

3. Au début de la simulation BFIREs effectue un tir aléatoire pour chaque assistant et le compare à une probabilité d'assistance, arbitrairement prédéfinie par l'utilisateur, pour décider si l'assistant va remplir sa mission de secours au cours de cette simulation ou si, au contraire, il va abandonner sa tâche et décider d'évacuer.

4. Si l'assistant décide de secourir la personne qui lui a été assignée, son cheminement vers l'occupant à assister est soumis aux mêmes lois probabilistes de déplacement que le mouvement d'un occupant normal vers la sortie. Atteindre la personne assistée est donc tout aussi aléatoire, pour ne pas dire improbable, quand la distance séparant la position initiale et le but devient importante, ou si un quelconque obstacle physique vient interrompre la ligne droite reliant l'occupant à son but.

Conclusion

En conclusion, BFIREs semble être le code de mouvement de personnes décrivant le plus finement les aspects de comportement humain et de prise de décision en situation de sinistre. L'analyse du modèle conduit à un constat plus nuancé: la modélisation du comportement humain, de l'enfumage et des phénomènes d'intoxication semble assez rudimentaire; quant à celle du mouvement de personnes, sans parler des problèmes de variation de la vitesse avec la densité, elle se montre incapable de déplacer les occupants vers la sortie dès que le maillage acquiert des dimensions un peu importantes. BFIREs ne peut pas, en tout cas, être perçu comme un outil de simulation d'évacuation. Mais il présente le grand mérite d'introduire des idées nouvelles, comme la représentation géométrique par maillage, et la tentative d'introduction, rarement effectuée dans ce genre de modèle, de règles de comportement humain.

III.3. Modèle de Berlin, Dutt & Gupta (1982)

Il s'agit d'un modèle dédié au problème de l'évacuation de bâtiments du type établissements de soins (comme le modèle ERM de D.M.Alvord présenté au § III.7. de ce chapitre) développé par G.N.Berlin, A.Dutt et S.M.Gupta¹¹². Très peu d'informations sont disponibles sur ce modèle étant donné qu'il n'a fait l'objet que d'une seule publication succincte. Son développement semble d'ailleurs avoir pris fin avant d'aboutir à une version opérationnelle. Nous ne le mentionnons ici que dans un souci d'être aussi complet que possible.

De l'avis de son concepteur D.M.Alvord, ERM et le modèle de Berlin, Dutt & Gupta présentent de grandes ressemblances. Le bâtiment y est représenté sous forme de réseau d'arcs et de noeuds. Les arcs sont valués d'une longueur. Deux catégories de personnes peuvent être introduites: les résidents et le personnel assistant.

Le modèle de Berlin, Dutt et Gupta prétend inclure les caractéristiques suivantes (qui ne figureront pas dans ERM):

- Choix de la politique d'assistance

Le personnel commence par évacuer { *les locaux les plus proches de la sortie*
les locaux les plus éloignés de la sortie
les locaux les plus "dangereux"

La manière de déterminer le local le plus dangereux n'est pas présentée.

- Trois possibilités s'offrent également pour le choix du trajet à suivre:

- *Chemin le plus court*
 - *Chemin le plus rapide*
 - *Chemin le moins "dangereux"*

Aucune de ces options n'est explicitée.

- Il est censé inclure une représentation des phénomènes de congestion; mais aucun autre détail n'est fourni, ni même sur les vitesses normales de déplacement.
- Enfin les auteurs affirment, sans plus d'explications, que leur proposition "*reproduit le développement du feu et la migration des produits de combustion*".

¹¹² [BERLIN 82a]

Il est difficile de conclure par un jugement la présentation de ce modèle, étant donné le peu d'informations disponibles.

III.4. EMBER (1982)

EMBER (Evaluation Methodology for Building Evacuation and Review)¹¹³, a été également réalisé par G.N.Berlin, et présente d'importantes ressemblances avec l'approche présentée précédemment (il est probable qu'EMBER soit la continuation du précédent projet défunt). Cette fois-ci le modèle est un peu mieux documenté. Sa particularité est de combiner un modèle d'évacuation à un modèle de progression du feu et de la fumée.

Comme pour le modèle précédent, deux catégories de personnes peuvent être introduites: les résidents et le personnel assistant.

- Les choix possibles de politique d'assistance demeurent les mêmes:

Le personnel commence par évacuer { *les locaux les plus proches de la sortie*
les locaux les plus éloignés de la sortie
les locaux les plus "dangereux"

Le mode de détermination du local le plus dangereux n'est toujours pas clarifiée.

- Le choix du trajet à suivre peut être à présent:

- *Chemin le plus court*
 - *Chemin le plus rapide*
 - *Cheminement le moins encombré*
 - *Chemin prédéterminé*

Encore une fois, l'auteur n'explique pas ce qui différencie le chemin le plus court du plus rapide, ni comment le chemin le moins encombré est déterminé.

¹¹³ [BERLIN 82b]

Le bâtiment est toujours représenté par un réseau, mais avec les informations supplémentaires suivantes relativement aux arcs (outre donc la longueur); on précise:

- s'il s'agit d'un escalier ou non,
- la largeur minimale du trajet réel que représente cet arc,
- la surface disponible aux mouvements de fumées (?)
- La dernière information sur les arcs qui doit être introduite est la "résistance minimale au feu de la barrière physique séparant éventuellement les deux noeuds que relie entre eux l'arc". Il n'est pas explicité ce que ce signifie plus précisément ce terme. S'agit-il d'une grandeur de résistance au feu réglementaire?..

La modélisation du feu dans EMBER repose sur une approche du type événementielle. Chaque état correspond à une phase de développement du feu. Un découpage classique d'un feu de local en phases peut être le suivant¹¹⁴:

1- Allumage du feu.

2- Combustion du premier objet. Cette étape se termine soit par:

- l'extinction du feu
- la propagation du feu à d'autres objets à l'intérieur du

local

3- Développement du feu à l'intérieur du local. Cette étape se termine soit par:

- l'extinction du feu
- l'embrasement généralisé (flashover)

4- Propagation entre volumes. Cette phase correspond à la propagation du feu à travers des ouvertures non protégées (portes ouvertes, vitrages). Les vecteurs de ce développement sont les échanges thermiques par convection et rayonnement.

5- Propagation entre compartiments. Cette dernière étape correspond au passage de l'incendie à travers des barrières physiques détruites (percement de portes, ruine de parois).

L'auteur ne précise pas s'il existe un tel découpage par défaut dans EMBER et, si oui, lequel. En tout cas, la durée de chaque phase de développement du feu n'est pas calculée par le modèle mais préalablement introduite par l'utilisateur. Sa détermination doit se baser sur des expériences ou des avis d'experts. Ainsi EMBER doit être alimenté avec les données suivantes pour chaque phase de développement du feu:

- durée
- débit de pyrolyse
- débit de CO

¹¹⁴ [NELSON 76]

- hauteur de flammes (?)

Le seul document disponible sur EMBER laisse planer de nombreuses questions sur la modélisation du feu. Il n'est nul part expliqué comment sont introduits les termes sources (chaleur et espèces) dans le modèle. A quoi sert la hauteur de flamme? Comment s'effectue le calcul des débits entre zones? La seule information fournie sur la modélisation du feu concerne le calcul de la température d'un local compte tenu des flux d'air en provenance des locaux voisins:

$$T_k(t) = \frac{\sum_j (f_{jk} \cdot T_j(t_0))}{V_k} + \frac{V_k - \sum_j f_{jk}}{V_k} T_k(t_0) \quad , \quad \text{si } \sum_j f_{jk} \leq V_k$$

$$T_k(t) = \frac{\sum_j (f_{jk} \cdot T_j(t_0))}{V_k} \quad , \quad \text{si } \sum_j f_{jk} \geq V_k$$

f_{jk} : Débit d'air intégré sur le pas de temps (= volume) depuis la zone j vers la zone k

V_k : Volume d'air de la zone k

T_k : Température de la zone k

t_0 : Pas de temps précédent

Nous voyons par conséquent que la température de la zone k à l'instant t ne découle pas d'un bilan thermique, mais se définit comme la moyenne des températures de toutes les zones avoisinantes au pas de temps précédent pondérées par les volumes d'air en provenance de chacune de ces zones. On peut également en déduire que la modélisation du feu s'appuie sur l'hypothèse que chaque volume est rempli de gaz chaud. Mais nous ne savons toujours rien du calcul des débits, ni du calcul de la température dans les locaux sources.

De toute façon, la question fondamentale est de savoir quel usage est fait des données calculées par le modèle de feu. Apparemment, elles n'influencent que le choix des personnes assistés (et si toutefois la tactique d'assistance retenue est "évacuation du local le plus dangereux"), encore eût-il fallu que l'auteur précisât le mode de détermination du degré de danger (à partir de la température du local et de la concentration en CO?).

Ainsi le mouvement des personnes se déroule comme s'il n'y avait pas d'incendie; par contre la densité d'occupation est censée influencer sur la vitesse de déplacement. La loi

de vitesse-densité utilisée est celle fournie par la *United States Fire Administration*, qui ne fait que reprendre la loi empirique de Togawa (voir §II.3.1):

$$v = 1,3 \cdot d^{-0,8}$$

v en m/s

d en personnes/m²

Cependant, la mise en oeuvre pratique de cette formule semble quelque peu problématique. Le calcul de la densité nécessite la connaissance précise des surfaces, ce qui est assez difficile avec une représentation de la géométrie par réseau.

III.5. Le Modèle de MacGregor Smith (1982)

Le code de calcul développé par MacGregor Smith¹¹⁵ (également référencé dans la littérature sous l'appellation Q2) exploite la théorie des files d'attente pour construire un réseau de files d'attente modélisant le processus d'évacuation d'un immeuble.

Rappelons brièvement qu'une file d'attente est un système aléatoire composé d'un ou plusieurs serveurs et d'une zone d'attente: *"Un réseau de files d'attente est un modèle de phénomènes d'attente composé d'un ensemble de stations à travers lesquelles circule une population de clients: ces derniers passent d'une station à l'autre selon des règles définies à l'aide de probabilités de transition."* [Lardeux 90a]

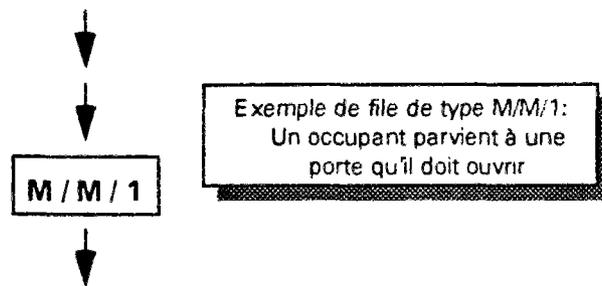
Smith modélise l'évacuation d'un bâtiment en considérant les pièces, couloirs, escaliers, issues et portes comme autant de files d'attente.

Types de files d'attente

Chacun des composants susmentionnés est modélisé dans le modèle de Smith suivant l'une des catégories suivantes de file d'attente:

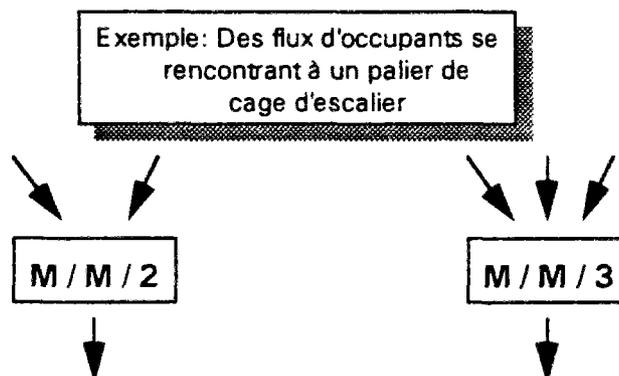
¹¹⁵ [MACGREGOR 82]

- **M/M/1:**



- La file ne possède qu'un seul serveur.
- Le service est du type FCFS (First Come - First Served)
- L'arrivée et le temps de service suivent une loi de probabilité exponentielle. Si, par exemple, \bar{T} est le temps moyen de service, la probabilité que le temps de service T soit supérieur à t peut suivre une loi du type: $P(T \geq t) = e^{-t/\bar{T}}$

- **M/M/x:**



- Caractéristiques semblables à M/M/1 mais avec convergence de plusieurs files en amont.

- **M/G/∞:**

- Modèle de décharge: Un nombre infini d'occupants peut être servi immédiatement. Le temps de service peut être nul ou constant
- Exemple: Un occupant ayant pénétré dans un couloir est servi immédiatement (il commence à se déplacer immédiatement). A partir de ce moment, il est supposé avoir besoin d'un délai constant pour atteindre le passage de porte suivant.

Chaque élément du bâtiment est représenté par une des files décrites ci-dessus. Voici un exemple de représentation d'éléments du bâtiment:

- Local sans obstacles: **M/G/∞**

- Porte de sortie d'un local: M/M/1
- Escaliers: M/G/∞
- Palier d'escalier: M/M/x
- Issue finale: M/G/∞

Le bâtiment étant décrit sous la forme d'un réseau de files d'attente, le modèle de Smith fait appel à l'algorithme MVA (Mean Value Analysis) qui calcule les valeurs moyennes de temps d'attente dans chaque file, de débit etc...

L'originalité du type de modèle adopté par l'approche de Smith lui confère un intérêt certain. La représentation d'un bâtiment sous forme d'un réseau de file d'attentes oblige à une analyse fonctionnelle de la géométrie, susceptible d'être par elle-même assez riche en informations sur le déroulement de l'évacuation (probabilité de présence de queues, étude des confluences,...). L'inconvénient majeur de cette démarche réside dans la difficulté de représentation des phénomènes d'encombrement: les temps de traversée des locaux sont constants, les temps de service sont, certes aléatoires, mais indépendants de la charge; la queue formée par les occupants en attente peut avoir une taille illimitée (la capacité des files est infinie), ce qui n'est évidemment pas compatible avec la réalité topographique (dimensions finies des volumes, propagation des bouchons vers l'amont). D'autre part, même si l'on suppose que le temps moyen de service peut être calculé à partir de la capacité du passage ($\bar{T} \approx 1/Q$), il est par la suite difficile d'estimer les lois de service qui doivent être introduites pour la description de chaque file d'attente. Il faut enfin répéter que les réseaux de files d'attente, comme d'ailleurs tous les réseaux, ne se prêtent pas à la description de configurations géométriques complexes, comprenant par exemple de grandes salles non compartimentées.

III.6. Le Potentiel d'évacuation (1982)

Le Potentiel d'Evacuation (Escape Potential) ne saurait être véritablement considéré comme un modèle d'évacuation. Il ne s'agit plutôt que d'une méthode d'évaluation de "l'évacuabilité" du bâtiment mise au point par G.N.Berlin¹¹⁶.

L'idée est simple: le potentiel d'évacuation se définit comme le nombre de trajets distincts disponibles, depuis un local vers un lieu protégé, défini préalablement

¹¹⁶ [BERLIN 82c]

comme tel, sans passer deux fois par le même local. La mise en oeuvre pratique proposée par Berlin se résume en une description du bâtiment sous forme de réseau, suivie de l'application d'un algorithme classique de recherche de tous les chemins menant à la sortie.

Si l'on se place dans une logique d'étude de danger, le potentiel d'évacuation est un concept qui peut théoriquement se révéler utile lors d'une analyse des modes de défaillance du système. En réalité, si l'on souhaite étudier le processus d'évacuation d'un immeuble, l'intérêt du potentiel d'évacuation est assez limité puisqu'il n'intègre aucune information, ni qualitative ni quantitative, sur les chemins recensés: longueur, capacité, complexité, familiarité, recoupement partiel de deux trajets... Tous les chemins sont considérés équivalents, seul leur nombre total est calculé.

III.7. ERM (Escape & Rescue Model) (1983-85)

ERM¹¹⁷ a été développé par D.M.Alvord (également auteur du code FEES / MB) au National Bureau of Standards vers 1983-1985, dans le but de simuler des procédures d'évacuation dans des établissements de petite taille, hébergeant des personnes à mobilité réduite, et plus généralement nécessitant une assistance pour évacuer (hospices, maison de retraite, asiles...).

ERM n'est donc pas un modèle général d'évacuation, mais un modèle dédié à l'étude de l'organisation des procédures d'évacuation dans ce type d'établissements. Ainsi on ne trouve pas dans ERM de modèle de feu ou de fumée, et les phénomènes d'encombrement ou de variation de la vitesse en fonction de l'occupation n'y sont pas décrits.

ERM simule la procédure d'évacuation d'un tel établissement sous la forme d'une suite d'événement discrets, qui s'enchaînent de manière déterministe. Les actions humaines sont prédéterminées; il n'y a donc pas de véritable simulation de comportement humain de prise de décision.

La représentation géométrique du bâtiment se fait, comme pour EVACNET, à l'aide d'un réseau, mais, cette fois-ci, les noeuds et arcs, qui représentent toujours respectivement les volumes et passages du bâtiment, ne contiennent pas

¹¹⁷ [ALVORD 83], [ALVORD 85]

d'information servant au calcul du temps d'évacuation (temps de traversée, capacité). Seules les coordonnées (x,y,z) des noeuds du graphe sont introduites par l'utilisateur. ERM en déduit la longueur des arcs, le déplacement s'effectuant à vitesse constante (mais non pas la même pour tous les occupants).

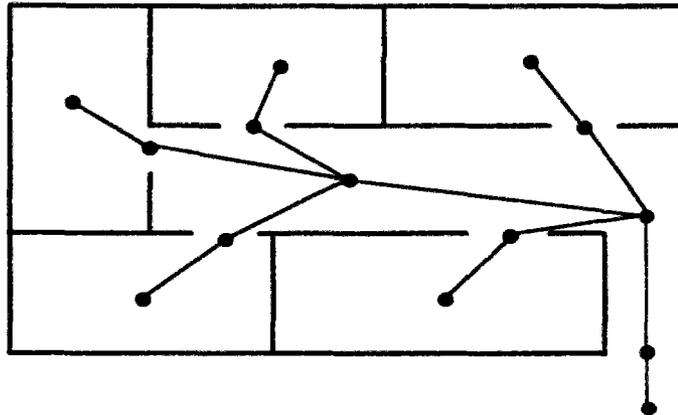


Fig. 30 - Représentation d'un bâtiment sous forme de réseau dans Escape & Rescue Model (ERM).

La modélisation des personnes (résidents et personnel) s'appuie sur les conclusions d'une importante étude menée aux Etats-Unis par le N.B.S. ayant pour but l'instauration d'un système d'évaluation de la sécurité. En l'occurrence, il s'agit du "Fire Safety Evaluation System for Board and Care Homes" (FSES / B+C)¹¹⁸. Cette étude a notamment permis de définir 15 types de résidents, suivant leur besoin d'assistance pour se déplacer, leur temps de préparation, le nombre d'assistants nécessaires,...

Pour une personne de type "résident" les données introduites par l'utilisateur sont les suivantes:

1. Besoin d'assistance pour la préparation (Oui / Non)
2. Besoin d'assistance pour le déplacement (Oui / Non)
3. Besoin d'assistance pour le déplacement dans les escaliers (Oui / Non)
4. Nombre de membres du personnel requis pour l'assistance au déplacement (0, 1 ou 2 membres)
5. Vitesse de déplacement (habituellement de 0,15 m/s à 1,5 m/s)
6. Position initiale
7. Temps de préparation à l'évacuation
8. Indice de priorité: elle indique dans quel ordre les résidents doivent être évacués.

Les caractéristiques 1 à 5 sont automatiquement attribuées si l'on choisit un des 15 types de résidents prédéfinis.

¹¹⁸ [NELSON 83]

Contrairement à BFIREs, les membres du personnel ne sont pas assignés à des résidents particuliers, mais sont disponibles pour n'importe quel occupant nécessitant assistance.

La simulation se déroule selon les règles suivantes:

- Après un certain délai de temporisation, introduit par l'utilisateur, les membres du personnel et les résidents sont alertés de la présence d'un incendie.
- A ce moment, les membres du personnel se dirigent vers les occupants requérant assistance selon l'ordre croissant des indices de priorité. Chaque membre du personnel devra accomplir une ou plusieurs des tâches suivantes auprès du résident: l'aider à se préparer, l'aider à évacuer, l'aider à se déplacer dans les escaliers.
- Au même instant, les résidents pouvant se préparer seuls à évacuer commencent à le faire.
- Dès qu'un résident pouvant se déplacer de manière autonome est prêt, il commence seul à évacuer.
- Dès qu'un membre du personnel a accompli sa tâche, il est considéré comme libéré. Un nouveau résident, toujours selon l'ordre de priorité, lui est désigné.
- Quand un membre du personnel atteint un résident nécessitant deux personnes pour l'aider, il attend qu'un autre assistant soit libéré et vienne les rejoindre (le premier libéré les rejoindra).
- La vitesse de déplacement du couple résident-assistant est celle de la personne assistée.
- La vitesse de déplacement dans les escaliers est réduite de moitié.

Etant donné que ERM utilise un réseau et non pas nécessairement une arborescence, il peut exister plusieurs chemins permettant de se rendre au même endroit. Dans ce cas, c'est le chemin le plus court (au sens de la distance) qui est retenu, celui-ci étant calculé à l'aide d'un algorithme de chemin minimal de graphe incorporé dans ERM.

En conclusion, l'intérêt principal d'ERM semble résider dans la possibilité qu'il offre de pouvoir traiter le cas particulier d'établissements hébergeant des personnes souffrant de problèmes moteurs. Il permet, notamment, d'assigner à chaque occupant des

caractéristiques particulières et donc de traiter les immeubles à population hétérogène. ERM offre également la possibilité d'étudier:

- les effets de la composition et de la répartition de la population sur le déroulement de l'évacuation,
- l'incidence de la politique d'évacuation adoptée (faut-il d'abord évacuer les résidents les plus mobiles ou les moins mobiles, le 1er étage ou le rez-de-chaussée,...)

Il convient cependant de ne pas perdre de vue les limites du modèle, et notamment l'inadéquation de ERM au traitement des établissements abritant une importante population, où des phénomènes d'embouteillage invalident l'hypothèse de déplacement à vitesse constante.

III.8. FEES / MB (1985)

FEES / MB¹¹⁹ (Fire Emergency Evacuation Simulation for Multifamily Buildings) est un modèle d'évacuation développé au N.B.S. vers 1984-1985 par D.M.Alvord (auteur également de Escape & Rescue Model), et conçu pour la simulation de l'évacuation d'immeubles d'habitation de taille réduite (immeubles collectifs, hôtels...).

FEES est un modèle relativement simple qui se base sur une hypothèse de déplacement à vitesse constante et uniforme pour tous les occupants. Le mode particulier d'introduction des données rend le fonctionnement du modèle probabiliste, alors que la simulation, en elle-même, est entièrement déterministe.

Indiquons les limitations du modèle, telles qu'elles sont annoncées par l'auteur lui-même:

- FEES n'intègre pas de modèle de feu ou de fumée.
- Il n'y a pas d'incidence du feu sur l'homme.
- Les phénomènes d'encombrement ne sont pas modélisés (vitesse constante).
- Le modèle ne reproduit pas de mécanismes humains de prise de décision.
- FEES ne peut pas traiter le cas d'immeubles incorporant de grandes salles (salles de réunions, restaurants).

¹¹⁹ [ALVORD 84], [ALVORD 85]

- Deux catégories d'occupants sont définies: le "personnel" et les "résidents", chacune de ces catégories étant composée d'individus possédant des caractéristiques identiques (vitesse de déplacement,...).

L'entrée des données constitue l'un des aspects les plus originaux de FEES. Nous allons la décrire et la commenter brièvement.

Bâtiment

- La modélisation du bâtiment repose sur une première décomposition de celui-ci en *cages d'escalier* et *étages*.
- Les *étages* sont supposés plans et composés de "*segments de couloir*". Un *segment de couloir* est défini par les coordonnées planes de ses deux extrémités. Ces extrémités sont numérotées et appelées "*noeuds de couloirs*".
- Chaque *segment de couloir* peut contenir plusieurs "*segments d'habitation*". Un *segment d'habitation* est défini par les coordonnées de ses deux extrémités.
- Un *segment d'habitation* peut contenir plusieurs "*unités d'habitation*".

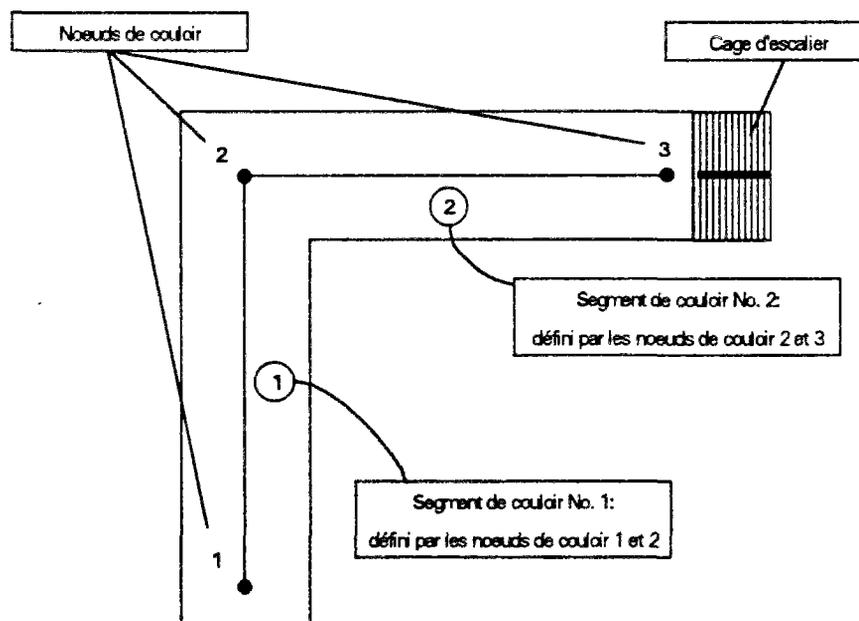


Fig. 31 - Représentation d'un étage de bâtiment dans FEES.

La figure 31 offre un exemple de représentation d'étage de bâtiment composé de deux couloirs et d'une cage d'escalier. Après avoir introduit les segments de couloir, l'utilisateur doit désigner les segments d'habitation qui se rattachent à ce couloir, au moyen des coordonnées (x,y) des extrémités du segment d'habitation. La dernière étape consiste à préciser le nombre de noeuds ou unités d'habitation dont est

composé chaque segment d'habitation. Chaque noeud d'habitation est censé représenter la porte palière d'un appartement, ou, plus généralement d'un local. FEES répartit automatiquement les noeuds d'habitation sur tout le segment de manière à ce qu'ils soient équidistants. La figure 32 donne un exemple de représentation de segments d'habitation.

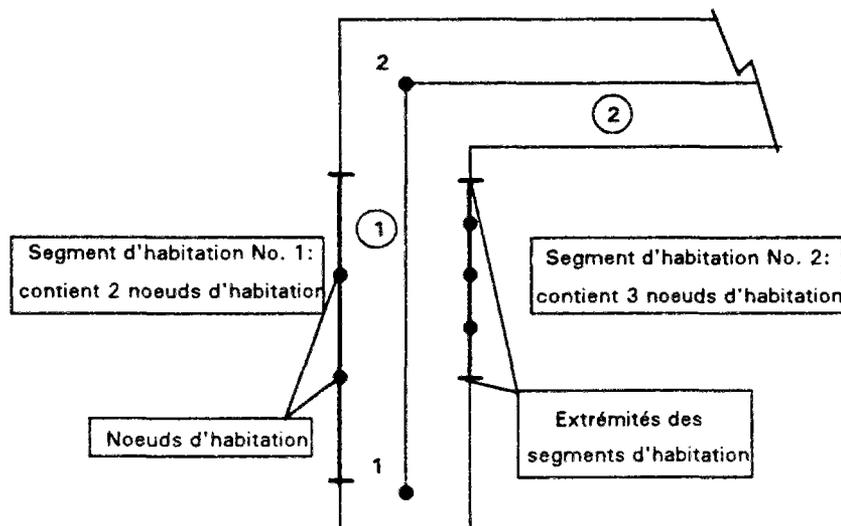


Fig. 32 - Détail de la représentation d'un segment de couloir dans FEES, comportant deux segments d'habitation, composés l'un de deux unités d'habitation, et l'autre de trois.

Une cage d'escalier est décrite par le noeud de couloir et l'étage de chacune de ses extrémités.

Cette modélisation de la géométrie du bâtiment, apparemment complexe, est bien adaptée à la représentation des constructions fortement compartimentées, comportant de nombreux volumes de forme linéaire, en autorisant notamment une saisie rapide des données géométriques. Ce type de modélisation utilisée dans FEES, n'est en fait qu'une forme de réseau du type graphe arborescent.

Résidents

Après avoir décrit la géométrie du bâtiment, l'utilisateur doit introduire les caractéristiques suivantes de description des résidents:

- Vitesse de déplacement. Elle est la même pour tous les occupants et demeure constante au cours de la simulation.
- Capacité à entreprendre de soi-même un mouvement d'évacuation / ou besoin d'être alerté pour commencer à évacuer. Cette caractéristique ne

concerne pas individuellement les résidents mais se réfère à toute l'unité d'habitation à laquelle un résident se rattache. Elle doit essentiellement être utilisée pour des scénarios simulant une évacuation nocturne. A cette occasion, un aspect probabiliste est introduit pour la première fois dans le modèle; l'utilisateur ne désigne pas les unités d'habitation qui doivent être alertées, mais indique simplement le nombre total de ces habitations sur chaque étage. Le modèle les choisit aléatoirement parmi les unités d'habitation de l'étage.

- Temps de préparation pour évacuer après le début de la simulation ou après l'alerte pour les occupants devant être alertés pour évacuer. Ce délai doit également inclure le temps nécessaire pour atteindre la porte palière de l'appartement, l'intérieur des locaux n'étant pas modélisé.
- La position initiale des résidents. L'utilisateur n'indique pas les coordonnées précises des occupants mais simplement leur répartition en nombres d'occupants par unité d'habitation. Par exemple, l'utilisateur indique qu'au premier étage il doit y avoir:
 - 10 unités avec 1 habitant et
 - 6 unités avec 2 habitants et
 - 1 unité avec 3 habitants.

Personnel

L'utilisateur de FEES a la possibilité d'introduire un certain nombre de membres du personnel. Leur fonction est d'alerter les occupants afin de leur permettre d'évacuer le plus rapidement possible. Cette option est modélisée comme suit dans FEES:

- L'utilisateur indique seulement le nombre de membres du personnel disponibles (≥ 0). En début de simulation, le modèle les place automatiquement aux sorties des cages d'escalier du niveau le plus bas.
- Un délai de temporisation doit être introduit pour reproduire le temps s'écoulant entre le début du feu et la mise en mouvement du personnel de l'immeuble.
- L'utilisateur doit également indiquer le temps consommé par le personnel pour alerter une unité d'habitation de la présence d'un feu. Ce délai peut-être court ou long, suivant l'hypothèse faite sur l'action du personnel (simplement frapper à la porte, ou entreprendre une recherche active).
- Enfin, pour chaque membre du personnel doivent être déclarés les étages et les segments de couloir qu'il doit investiguer.

Simulation

L'introduction de toutes ces données permet de procéder à la simulation de l'évacuation du bâtiment.

La logique de déplacement des occupants est simple: ils suivent l'arborescence du réseau à vitesse constante. Leur vitesse de déplacement dans les escaliers est considérée égale à la moitié de la vitesse normale.

Les membres du personnel suivent un cheminement plus complexe. Après le délai de temporisation, chaque membre se met en mouvement et se déplace:

- en premier lieu vers l'étage le plus proche parmi ceux qui lui ont été assignés,
- puis vers le segment de couloir le plus proche,
- enfin vers le segment d'habitation le plus proche où il commence à alerter les unités d'habitation nécessitant cette action pour que leurs occupants commencent à évacuer.
- Cette logique se répète jusqu'à épuisement de toutes les unités d'habitation assignées au membre du personnel. Ce n'est qu'alors que celui-ci peut évacuer les lieux.

De l'étude des caractéristiques de FEES / MB, on peut conclure qu'il s'agit d'un modèle d'évacuation assez rudimentaire, mais qui présente les avantages d'être assez simple d'usage, et de se baser sur des hypothèses de travail tout à fait claires. Rappelons qu'il n'intègre pas de phénomène de congestion et de variation de la vitesse de déplacement avec la densité, ni ne comporte de description du feu et de ses effets sur les occupants. L'attrait principal de FEES semble résider dans la possibilité de simuler l'implication du personnel chargé d'alerter les résidents de la présence du feu. En effet, un modèle d'évacuation tel FEES, basé sur l'hypothèse de déplacement à vitesse constante, ne possédant pas cette option n'aurait pas de sens: dans ce cas il suffit de connaître la distance de l'occupant le plus éloigné par rapport à la sortie et sa vitesse de déplacement pour connaître également le temps d'évacuation du bâtiment. Cette fonctionnalité de FEES permet de tester l'organisation de l'alerte d'un bâtiment en vue de son évacuation en cas d'incendie; on pourrait ainsi examiner, par exemple, l'influence des effectifs du personnel d'un hôtel et de la répartition des locataires des chambres sur l'efficacité d'une procédure d'évacuation de nuit.

III.9. Takahashi - Tanaka (1987)

En 1987 a été présenté un modèle d'évacuation (non baptisé) par T.Tanaka et K.Takahashi¹²⁰. Peu de détails sont connus sur ce travail puisque, à notre connaissance, il n'a suscité qu'une seule publication.

Géométrie

La modélisation de la géométrie dans le modèle Tanaka - Takahashi est originale, en ce sens qu'elle ne s'appuie pas sur un réseau classique, comme le font la quasi-totalité des modèles existants. Le bâtiment est représenté sous la forme des composants suivants:

	1. Local:	- Comprend des occupants et une seule sortie - Pour introduire plusieurs sorties il faut utiliser plusieurs locaux
	2. Couloir:	- Pas d'occupants initialement - Comprend 1 Entrée et 1 Sortie
	3. Escaliers:	= Couloir vertical
	4. Vestibule:	- 1 Entrée + 1 Sortie vers un Escalier
	5. Hall:	- Multi-entrées, multi-sorties avec des liens entre eux
	6. Refuge:	- Zone finale de destination des occupants
Eléments fictifs	7. Lien:	- Élément de liaison sans capacité - Utilisé pour réguler les flux de personnes
	8. Bouchon:	- "Crowding" en anglais - Espace imaginaire recevant des occupants qui ne peuvent pas avancer vers l'élément suivant

La représentation géométrique adoptée suppose également qu'il n'y a qu'une seule issue par élément de type "Local" et que celle-ci se trouve dans un angle du local. Si ce n'est pas le cas, il faut utiliser deux locaux ou plus [Fig. 33].

¹²⁰ [TAKAHASHI 87]

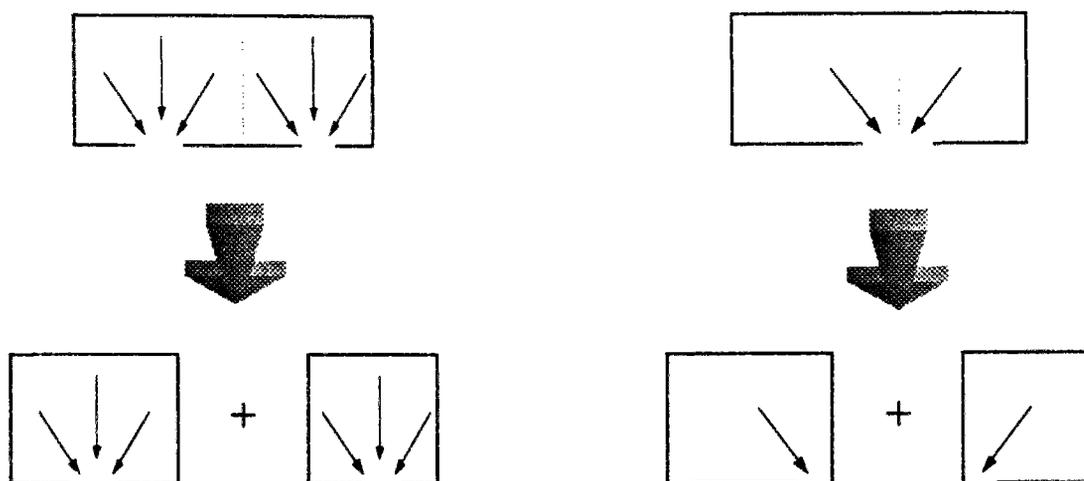


Fig. 33 - Décomposition d'un local si l'on y trouve plusieurs issues, ou si l'issue n'est pas située dans un angle.

Lors de la description géométrique des éléments, l'utilisateur doit également indiquer les dimensions caractéristiques. Par exemple pour un élément de type "Local": longueur, largeur et pour la porte sa largeur. Cette dernière dimension permet de calculer le débit maximal de l'issue. Pour finir, le calcul de ces débits nécessite également l'introduction de la part de l'utilisateur des débits spécifiques (débit par mètre de largeur). Voici les valeurs préconisées par les auteurs:

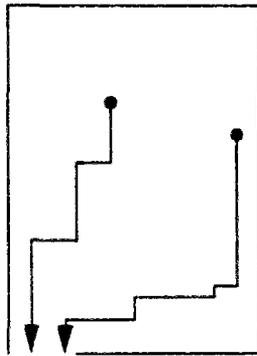
- 1,5 personnes / (m . s) dans les circulations horizontales
- 1,3 personnes / (m . s) dans les cages d'escalier.

Déplacement des occupants

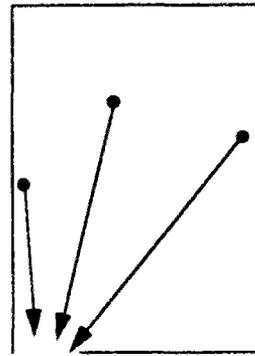
Le modèle de Takahashi et Tanaka est un modèle typiquement "fluidique". Les occupants sont supposés uniformément répartis dans chaque local au début de la simulation. La vitesse de déplacement introduite par l'utilisateur est constante et uniforme. Les phénomènes de congestion sont reproduits au moyen de la formation de retenues en amont des issues de chaque élément, chaque fois que le débit tend à dépasser la capacité du passage.

Élément du type "Local"

Le mouvement des personnes dans les éléments de type "Local" peut être modélisé selon deux modes:



Mouvement en zigzag
(s'il y a des obstacles)



Mouvement centripète
(s'il n'y a pas d'obstacles)

La vitesse de déplacement est supposée constante et uniforme. Les figures 34 et 35 représentent les différentes phases de l'évacuation d'une pièce suivant les deux modes de mouvement.

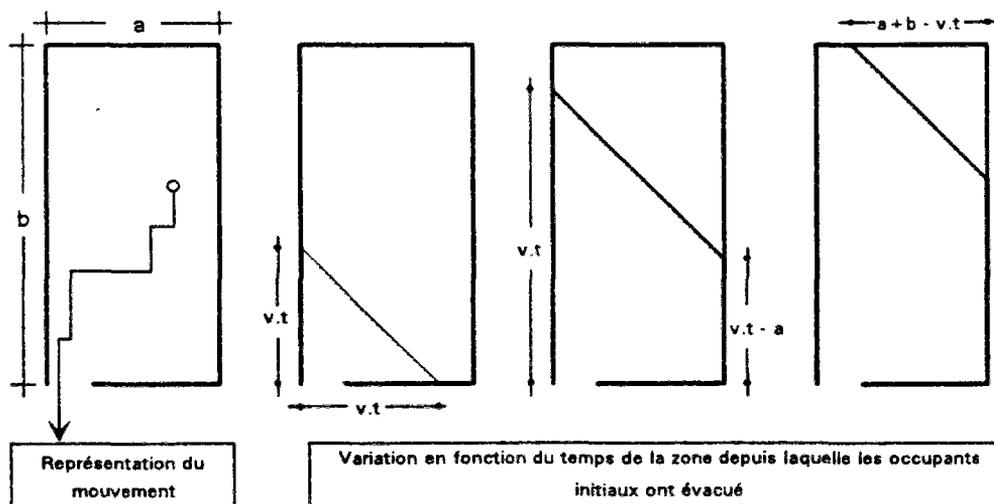


Fig. 34 - Evacuation d'un local - Mouvement en zigzag.

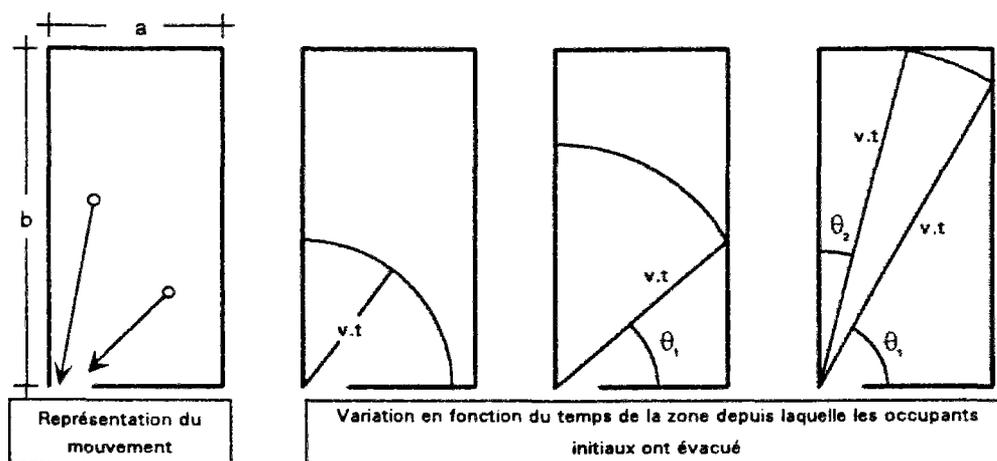


Fig. 35 - Evacuation d'un local - Mouvement centripète.

Pour chacun de ces deux modes nous indiquons les formules fournies par les auteurs pour le nombre d'évacués en fonction du temps, et calculons le débit correspondant (hypothèse $a < b$)¹²¹:

Mouvement en zigzag

$$\left\{ \begin{array}{ll} N = \frac{d}{2} (vt)^2 & 0 \leq t \leq \frac{a}{v} \\ N = d \left(avt - \frac{a^2}{2} \right) & \frac{a}{v} \leq t \leq \frac{b}{v} \\ N = d \left(ab - \frac{(a+b-vt)^2}{2} \right) & \frac{b}{v} \leq t \leq \frac{a+b}{v} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} Q = \frac{d}{4} v^2 t & 0 \leq t \leq \frac{a}{v} \\ Q = dav & \frac{a}{v} \leq t \leq \frac{b}{v} \\ Q = dv(a+b-vt) & \frac{b}{v} \leq t \leq \frac{a+b}{v} \end{array} \right.$$

- Où
- t : Temps écoulé depuis le début de la simulation (secondes)
 - N : Nombre d'occupants ayant évacué à l'instant t (personnes)
 - Q : Débit d'évacuation (personnes / seconde)
 - v : Vitesse de déplacement (mètres / seconde)
 - d : Densité d'occupation (personnes / m²)

¹²¹ Les formules de calcul du nombre d'occupants N en fonction du temps sont fournies par les auteurs. Nous avons établi les formules fournissant le débit Q en posant $Q = dN / dt$.

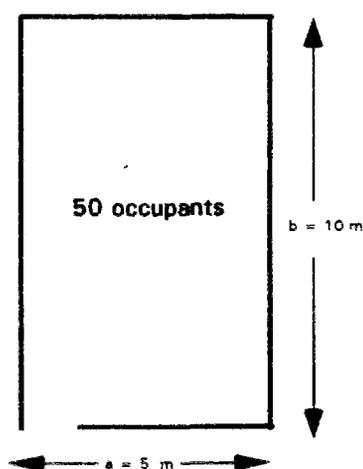
Mouvement centripète

$$\left\{ \begin{array}{l} N = \pi \frac{d}{4} (vt)^2 \quad 0 \leq t \leq \frac{a}{v} \\ N = \frac{d}{2} vt \left(\frac{\pi}{2} vt - \vartheta_1 vt + a \cdot \sin \vartheta_1 \right) \quad \frac{a}{v} \leq t \leq \frac{b}{v} \\ N = \frac{d}{2} vt \left(\frac{\pi}{2} vt - \vartheta_1 vt - \vartheta_2 vt + a \cdot \sin \vartheta_1 + b \cdot \sin \vartheta_2 \right) \quad \frac{b}{v} \leq t \leq \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{v} \end{array} \right.$$

$$\vartheta_1 = \arccos \frac{a}{vt}, \quad \vartheta_2 = \arccos \frac{b}{vt}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Q = \pi \frac{d}{2} v^2 t \quad 0 \leq t \leq \frac{a}{v} \\ Q = \frac{d}{2} \left[\pi v^2 t - vt (f_1 + 2v\vartheta_1) + a(v \cdot \sin \vartheta_1 + f_1 \cdot \cos \vartheta_1) \right] \quad \frac{a}{v} \leq t \leq \frac{b}{v} \\ Q = \frac{d}{2} \left[\pi v^2 t - vt (f_1 + f_2 + 2v(\vartheta_1 + \vartheta_2)) + a(v \cdot \sin \vartheta_1 + f_1 \cdot \cos \vartheta_1) + \right. \\ \left. b(v \cdot \sin \vartheta_2 + f_2 \cdot \cos \vartheta_2) \right], \quad \frac{b}{v} \leq t \leq \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{v} \end{array} \right.$$

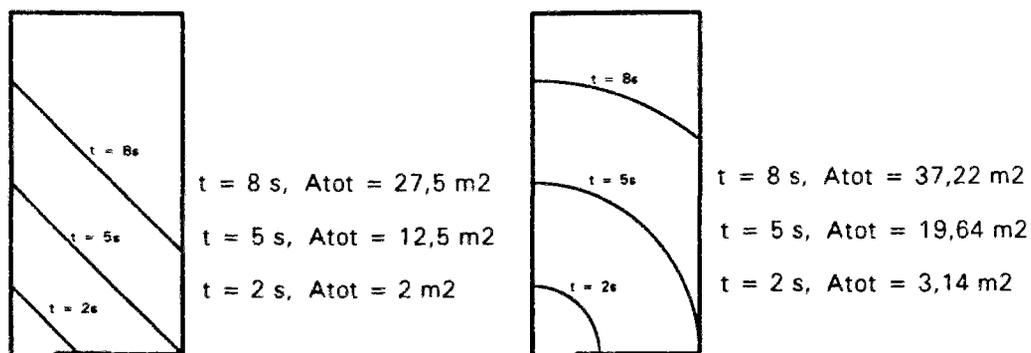
$$f_1 = \frac{a}{\sqrt{t^2 - \frac{a^2}{v^2}}}, \quad f_2 = \frac{b}{\sqrt{t^2 - \frac{b^2}{v^2}}}$$



- Prenons l'exemple d'un local de dimensions 5m X 10m avec une occupation de 50 personnes (densité $d = 1$ personne / m²). Supposons également que la vitesse de déplacement v soit égale à 1m / s.

- La vitesse de déplacement nous permet de calculer les aires initialement occupées par des personnes ayant évacué le local.

- A partir de ces aires et de la densité d'occupation nous déduisons directement le nombre d'évacués à chaque pas de temps [Fig. 36].
- A l'aide de ces valeurs, on obtient le débit théorique (sans congestion) d'évacuation du local.



Zig-zag

Centripète

Fig. 36- Aires dont les occupants initiaux ont évacué à divers instants

Pour le cas de notre exemple, nous avons représenté sur les figures 37 à 40 le nombre d'évacués ainsi que le débit d'évacuation en fonction du temps, pour les deux modèles de mouvement.

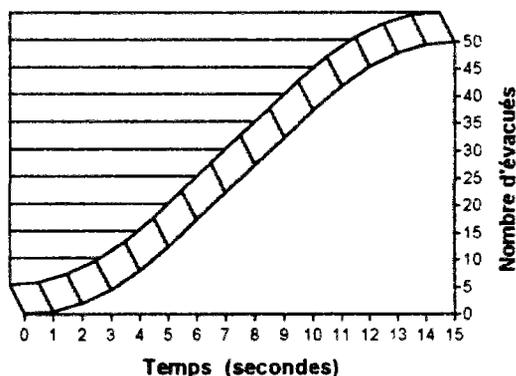


Fig. 37 - Nombre de personnes ayant évacué en fonction du temps - Mouvement en zigzag.

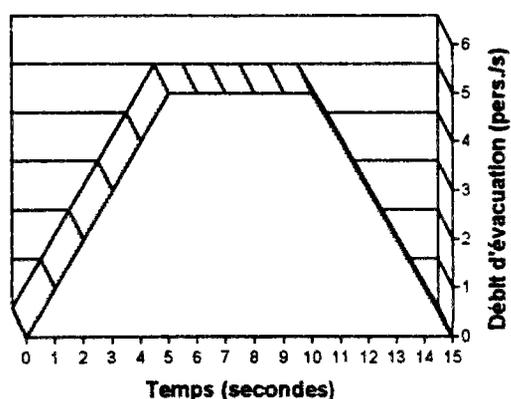


Fig. 38 - Débit d'évacuation en fonction du temps - Mouvement en zigzag.

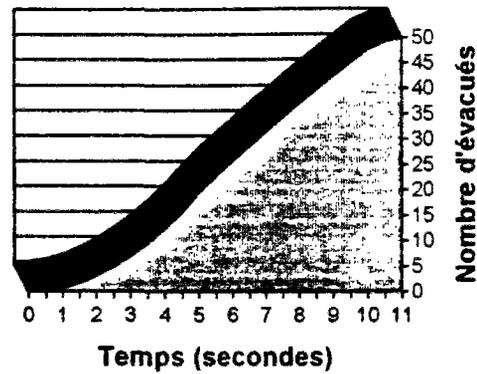


Fig. 39 - Nombre de personnes ayant évacué en fonction du temps - Mouvement centripète.

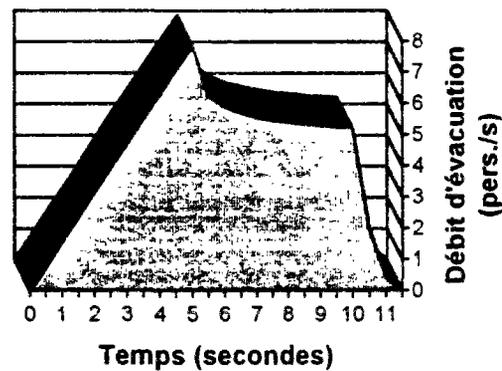


Fig. 40 - Débit d'évacuation en fonction du temps - Mouvement centripète.

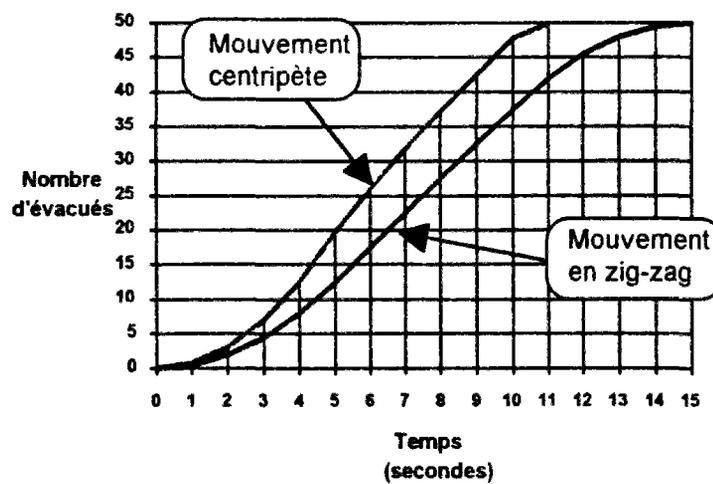


Fig. 41 - Comparaison du nombre de personnes ayant évacué en fonction du temps: mouvement en zigzag - mouvement centripète.

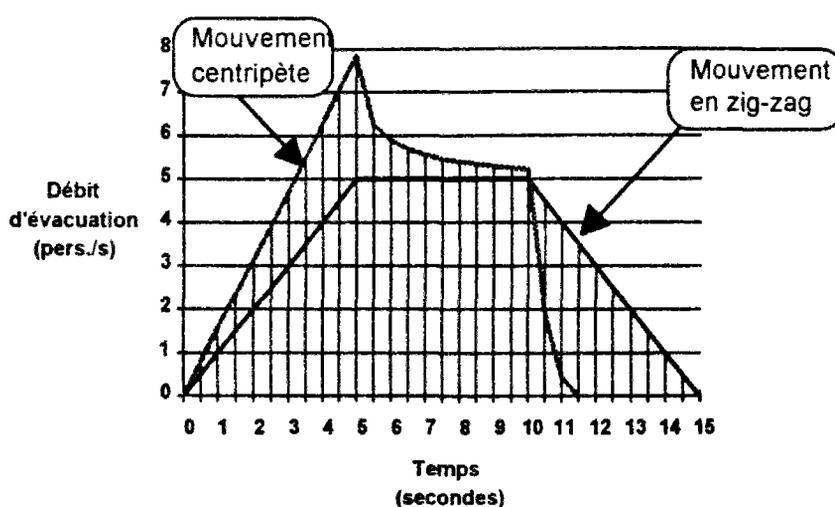


Fig. 42 - Comparaison des débits d'évacuation en fonction du temps: mouvement en zigzag - mouvement centripète.

Nous remarquons que suivant le modèle de mouvement retenu, le profil d'évacuation de la salle est sensiblement différent. Si nous prenons par exemple la valeur typique de 1,7 personnes/(m·s) comme débit maximal d'évacuation dans une issue, nous constatons qu'il faudrait une porte de 3 mètres pour le mouvement en zigzag, et respectivement de 4,7 m pour le mouvement centripète, afin qu'il ne se produise pas de bouchon à la sortie. Or les auteurs n'expliquent pas clairement ce qui se produit si ce débit tend à dépasser la capacité de la porte. On peut supposer qu'il est fait appel à l'élément fictif "Bouchon", mais peu d'informations sont fournies sur le fonctionnement de ce composant du système. Rappelons qu'en tout cas le déplacement s'effectue à vitesse indépendante de la densité à l'intérieur de la salle.

Quand un bouchon se produit à une issue d'un local comportant plusieurs issues, le modèle procède à une "redistribution" des occupants dans un souci de minimiser le temps total l'évacuation du local. Ce temps minimal correspond à la situation où toutes les issues sont mises à contribution:

$$T_{min} = \frac{\sum Cr(i)}{\sum Q_{out}(i)}$$

$Cr(i)$: Nombre de personnes dans le bouchon à l'issue i

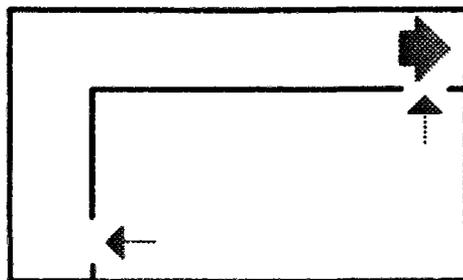
$Q_{out}(i)$: Débit d'évacuation de l'issue i

Après redistribution, le nombre de personnes dans la zone d'attente à l'issue i devient:

$$C'r(i) = Q_{out}(i) \cdot T_{min}$$

Une telle redistribution des occupants appelle deux remarques.

1. Tout se passe comme si les occupants étaient instantanément déplacés d'une issue du local à l'autre.
2. Dans la réalité, toutes les issues ne sont pas équivalentes quant au trajet aval que devra suivre l'occupant pour atteindre la sortie finale de l'immeuble. La figure suivante présente un exemple très simple de local à 2 issues, dont l'une est beaucoup plus proche que l'autre de la sortie du bâtiment:



Couloirs - Escaliers - Vestibules

Les couloirs, escaliers et vestibules sont subdivisés en unités dont la longueur correspond à la distance parcourue par les occupants au cours d'un pas de temps de calcul: $v \cdot \Delta t$ (v est constant). Le modèle considère qu'à chaque pas de calcul les occupants sont intégralement déplacés d'une unité vers la suivante.

Éléments du type "Hall"

L'autre aspect majeur de la représentation du déplacement des personnes dans le modèle d'évacuation de Tanaka & Takahashi concerne le fonctionnement du composant du type "Hall" (multi-entrées, multi-sorties), représentant les éléments de géométrie complexe d'un bâtiment. Le modèle procède à une optimisation de l'usage des issues en répartissant convenablement les occupants entre les sorties disponibles. S'il n'y a pas de formation de bouchon, la répartition est calculée de la manière suivante:

- Soit un Hall comprenant N personnes et n sorties. Soit:
 - Q_i la capacité de chaque sortie i (personnes/seconde).
 - t_i le temps moyen nécessaire pour atteindre la sortie i .
 - N_i le nombre d'occupants empruntant la sortie i = inconnues.

• S'il n'y avait qu'une seule sortie, le temps d'évacuation depuis le Hall T aurait pu être approché à l'aide de la formule suivante¹²²:

$$T = t + \frac{N}{Q}$$

• Dans le cas de sorties multiples, et avec les hypothèses et simplifications suivantes:

- il ne se forme pas de bouchons,
- la vitesse de déplacement est constante,
- tous les occupants sont supposés occuper le même emplacement

initial \Leftrightarrow les t_i sont les mêmes pour tous les occupants,

l'évacuation optimale est obtenue s'il y a une exploitation maximale de toutes les issues \Leftrightarrow il ne faut pas que l'évacuation par une sortie s'arrête alors qu'il y existe encore des occupants en attente d'évacuation à d'autres issues. On peut alors écrire:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{min} = t_1 + \frac{N_1}{Q_1} = t_2 + \frac{N_2}{Q_2} = \dots = t_n + \frac{N_n}{Q_n} \\ N = N_1 + N_2 + \dots + N_n \end{array} \right\} \Rightarrow T_{min} = \frac{N + \sum_{i=1,n} Q_i \cdot t_i}{\sum_{i=1,n} Q_i}$$

La connaissance de T_{min} permet le calcul des N_i :

$$N_i = Q_i \cdot (T_{min} - t_i)$$

$$\text{Si } \forall i: t_i = 0, \Rightarrow N_i = N \cdot \frac{Q_i}{\sum_{i=1,n} Q_i}$$

S'il y a formation de bouchon, la répartition se fait de la manière suivante:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{min} = t_1 + \frac{C'_1 + N_1}{Q_1} = \dots = t_n + \frac{C'_n + N_n}{Q_n} \\ N = N_1 + N_2 + \dots + N_n \end{array} \right\} \Rightarrow T_{min} = \frac{N + \sum_{i=1,n} (C'_i + Q_i \cdot t_i)}{\sum_{i=1,n} Q_i}$$

¹²² Cette formule est héritée des approches empiriques présentées dans la deuxième partie de ce chapitre (voir notamment la formule de Togawa et les remarques émises à ce propos). Illustrons par l'exemple les limites de cette formule. Sur l'exemple de la salle de 5mX10m avec 50 occupants, nous avons vu qu'avec un modèle de mouvement en zigzag et une issue de 3 mètres, il n'y avait pas de congestion. Ceci signifie (en faisant abstraction d'une éventuelle congestion à l'aval de la porte qui peut se répercuter jusque dans la salle), que le temps d'évacuation est de 15 secondes. Ce temps correspond à la première composante de la formule, et par conséquent la prise en compte de la deuxième composante N/Q n'a pas de sens. Avec une capacité spécifique de 1.7p/(m.s), le deuxième terme entraîne une augmentation du temps calculé de 10 secondes (25 secondes au total). En réalité les phénomènes sont encore plus complexes: le premier mode de calcul donnant un temps d'évacuation de 15 secondes n'est pas tout à fait correct lui non plus, puisqu'il néglige la variation de la vitesse en fonction de la densité à l'intérieur de la salle à évacuer.

C'_i représente une prévision du bouchon à l'issue i , après un laps de temps égal à t_i :

$$C'_i = \begin{cases} C_i + W_i - Q_i \cdot t_i & \text{si } C_i + W_i \geq Q_i \cdot t_i \\ 0 & \text{si } C_i + W_i \leq Q_i \cdot t_i \end{cases}$$

Ici aussi, quelques remarques peuvent être émises:

- Le trajet aval est encore une fois ignoré; le modèle procède à une optimisation comme si le problème consistait en l'éloignement le plus rapide de l'occupant du local actuel, et non du bâtiment. Ceci peut conduire à choisir une issue du Hall très éloignée de la sortie finale du bâtiment.
- Les temps de déplacement à l'intérieur du Hall sont constants et indépendants de la densité d'occupation.

Conclusion

Le modèle de Tanaka et Takahashi présente un grand intérêt car il constitue une des propositions les plus originales, tant par la description assez fine de la géométrie, que par le mode de représentation des phénomènes d'encombrement qui se produisent lors de l'évacuation d'un bâtiment. La reproduction de ce phénomène n'est pas obtenue par l'introduction d'une vitesse variable, fonction de la densité d'occupation, mais par le truchement d'une description du mouvement en deux états discrets: vitesse constante ou arrêt. La mise en oeuvre pratique de ce principe n'est pas clairement explicitée dans le document publié. Il est enfin à signaler qu'il s'agit d'un des rares modèles qui soit présenté avec une étude de validation, basée sur des observations d'évacuation de salles de spectacle.

Il est cependant difficile de porter un jugement sur les comparaisons calcul-observations présentées, car deux approches de calcul ont été retenues par les auteurs:

- modélisation de la salle comme un seul local avec mouvement en zigzag,
- et décomposition de la salle en de nombreuses zones, couloirs, etc...

or il s'avère qu'une des deux approches fournit toujours, suivant le cas étudié, des résultats raisonnablement satisfaisants.

III.10. EXITT (1987-88)

Comme nombreux des modèles déjà exposés, EXITT¹²³ a été réalisé au National Institute of Standards and Technology (ex-NBS), cette fois-ci par B.M.Levin. Il s'agit d'un des modèles d'évacuation les plus récents (1987), et qui se veut également l'un des plus complets. EXITT est conçu pour simuler les décisions prises et les actions réalisées par les occupants au cours de l'évacuation de bâtiments résidentiels de faibles dimensions suite à la déclaration d'un incendie. Il fait partie du logiciel de sécurité incendie HAZARD I diffusé par le NIST, et qui regroupe divers modèles élaborés dans ce centre de recherche dans les années 80: EXITT, FAST, TENAB...

Les caractéristiques d'EXITT sont les suivantes:

- EXITT est un modèle d'évacuation en cas d'incendie aspirant à intégrer les effets du feu sur le déroulement de la procédure d'évacuation. Pour ce faire, EXITT coopère avec FAST, un modèle de mouvement de fumée, voisin du modèle CIFI du CSTB. EXITT est donc conçu pour être alimenté en résultats de simulations en provenance de FAST, ou de tout autre logiciel similaire, bâti sur l'hypothèse de 2 couches gazeuses distinctes. Ces données agissent sur le comportement et les actions des occupants.
- Les occupants peuvent être autonomes ou bien avoir besoin d'assistance pour évacuer.
- L'évacuation n'est pas la seule possibilité d'action offerte aux occupants: ils peuvent inspecter les lieux pour vérifier la source et la nature du danger, assister d'autres personnes...

EXITT n'intègre pas les phénomènes suivants:

- L'action de combattre le feu.
- Les effets physiologiques de la chaleur et de la fumée sur l'occupant. Par contre les sorties d'EXITT peuvent être directement introduites dans TENAB, le module de HAZARD qui est chargé de réaliser ces calculs et de décider de la tenabilité.
- Les phénomènes de variation de la vitesse de déplacement et d'encombrement dus à une densité d'occupation élevée.

Examinons à présent plus analytiquement les différentes caractéristiques d'EXITT.

¹²³ [LEVIN 87], [LEVIN 88]

Modélisation du Bâtiment

Comme pour la plupart des modèles d'évacuation, le bâtiment est décrit sous forme d'un réseau d'arcs et de noeuds. A chaque arc est associée une longueur, tandis que pour chaque noeud, l'utilisateur doit indiquer le local auquel celui-ci appartient. Ceci permet de déterminer les conditions d'enfumage du noeud, d'après les résultats fournis par le modèle de mouvement de fumées.

Enfumage

L'action de la fumée est modélisée dans EXITT via l'introduction de la variable S censée représenter l'état de l'enfumage du local. Cette variable S est définie selon la formule empirique:

$$S = 2 \cdot OD \cdot (E/H)$$

avec:

S : Variable d'enfumage

OD : Densité optique de la fumée (1/m)

E : Epaisseur de la couche de gaz chauds sous plafond (fournie par FAST)

H : Hauteur sous plafond du local

La densité optique de la couche gazeuse est quant à elle définie comme suit:

$$OD = \ln(L_0/L)$$

avec:

L_0 : Intensité initiale de la lumière (à 1 mètre)

L : Intensité actuelle de la lumière

Nous verrons par la suite comment la valeur de la variable S conditionne plusieurs types d'événements dans EXITT.

Détecteurs et Alarme

Il est possible avec EXITT de tenir compte de la présence de détecteurs de fumée. La modélisation des détecteurs se base sur la simple règle suivante:

$$L'alarme \text{ est déclenchée si } \begin{cases} OD \geq 0,15 \\ \& \\ E \geq 0,15 \text{ (m)} \end{cases}$$

Par défaut, le niveau acoustique de l'alarme sonore est de 35 db. L'utilisateur a la possibilité de modifier cette valeur.

Modélisation des occupants

Les caractéristiques principales qui doivent être introduites pour la description des occupants sont les suivantes:

- La vitesse normale de déplacement (ce terme sera explicité plus loin).
- Le besoin ou l'absence de besoin d'assistance pour évacuer. EXITT n'intègre pas la présence de personnel ayant mission d'assister les occupants pour l'évacuation. Les personnes ne pouvant évacuer seules devront être aidées par d'autres occupants.
- L'état initial de l'occupant: endormi ou éveillé.

La documentation sur EXITT fait également état d'autres données devant être introduites pour la description des occupants (sexe, âge...) sans que soit explicité l'usage qui est fait de ces données.

La première réaction humaine qu'aspire à reproduire EXITT est celle de la perception du feu par l'occupant. Cette réponse de l'occupant aux stimuli en provenance de l'incendie s'exprime par un délai de perception du feu depuis la déclaration de l'incendie. Le calcul de ce délai s'effectue suivant une formule empirique inspirée entre autres des travaux de Nober¹²⁴ sur la capacité d'éveil des systèmes d'alarme:

$T = 70 - 4 \cdot (C - 20) \text{ en secondes,} \quad \text{pour } C \geq 20$ $T = + \infty, \quad \text{pour } C < 20$

$$C = (A - B) + X_1 + X_2 + X_3 + X_4$$

avec:

A: Niveau acoustique de l'alarme sonore
 B: Niveau du bruit de fond

} (A - B) toujours ≥ 0

X_1 : Impact du fait de voir le feu

$X_1 = 100$ (par défaut) si l'occupant se trouve dans un local - feu
$X_1 = 0$ pour une personne endormie

X_2 : Influence de l'odeur en provenance du feu (fonction non précisée de la variable S)

X_3 : Impact du fait de voir la fumée (fonction non précisée de la variable S)

X_4 :

= 0	si l'occupant est endormi
= 15	si l'occupant est éveillé

¹²⁴ [NOBER 81]

La documentation existante sur EXITT ne fournit pas de détails sur l'expression des variables X_2 et X_3 en fonction de S .

Les occupants nécessitant assistance, même s'ils sont avertis de la présence du feu, ne peuvent amorcer seuls aucune action.

Par contre, les occupants autonomes, prévenus de l'existence du danger, ont un choix multiple d'actions qu'ils peuvent engager conformément aux priorités suivantes:

1. Entamer une inspection des lieux pour vérifier la source et la nature du danger. Cette action est interrompue au profit de la suivante si l'occupant au cours de son chemin vers le local-source du feu rencontre un local avec $S > 0,05$.

2. Assistance dans le même local.

3. Assistance dans un autre local.

4. Evacuation.

Ici, le terme d'assistance est utilisé dans un sens large, et ne signifie pas nécessairement assistance au déplacement; il peut s'agir simplement de réveiller d'autres occupants.

Dans le cas d'un déplacement assisté, la vitesse du couple assistant-assisté est la moitié de celle de l'assistant dans les mêmes conditions.

Lors du passage d'une action à la suivante, les occupants observent une pause de 3 secondes.

Dans chacune des actions précédentes des occupants, le déplacement se fait selon un trajet optimal en longueur, calculé à l'aide d'un algorithme de chemin minimal de graphe. La possibilité d'évacuation par les fenêtres est prévue dans le modèle à condition que soit introduit un noeud du réseau à l'emplacement correspondant. Lors de la recherche du chemin optimal, la longueur de tout trajet empruntant le passage par une fenêtre est forfaitairement majorée de 100 mètres.

Influence de l'enfumage

Les conditions ambiantes peuvent conditionner plusieurs éléments d'une simulation avec EXITT: la réalisation des actions citées précédemment, le choix du chemin optimal, ou la vitesse de déplacement peuvent dépendre des conditions d'enfumage. Voici les règles utilisées par EXITT:

- L'action d'investigation est interrompue si l'occupant au cours de son chemin vers le local source du feu rencontre un local avec $S > 0,05$.

- Lors du calcul du chemin optimal, tout trajet traversant une zone avec $S > 0,1$ est forfaitairement majoré de 200 mètres.
- Si, à n'importe quel moment de son cheminement, un occupant s'est retrouvé dans une zone à $S > 0,1$, sa vitesse pour le reste de la simulation est majorée de 30%. Ceci est censé représenter l'empressement de l'occupant suite à la prise de conscience de l'ampleur du danger.
- A chaque fois qu'un occupant rencontre sur son parcours une zone de $S > 0,4$, le calcul de son chemin optimal est réeffectué.
- Si tous les chemins qui s'offrent à un occupant à un instant donné traversent un local avec $S > 0,4$, l'occupant est considéré comme bloqué.
- A l'intérieur d'un local avec $S > 0,4$ la vitesse de déplacement est réduite de 40%.
- Les locaux avec $S > 0,5$ et $(H - E) < 1,2$ m sont considérés impraticables et systématiquement exclus des parcours possibles.

Le tableau suivant résume ces différentes règles.

Etat de l'enfumage	Conséquence
$S > 0,05$ rencontré	Interruption de l'action d'investigation
$S > 0,1$ sur un chemin	Majoration de 200 mètres de la longueur du trajet dans le calcul du chemin optimal
$S > 0,1$ rencontré	Majoration de 30% de la vitesse de l'occupant pour le reste de la simulation
$S > 0,4$ rencontré	Reformulation du chemin optimal
à l'intérieur de $S > 0,4$	Diminution de 40% de la vitesse de l'occupant à l'intérieur de ce local
$S > 0,4$ sur tous les chemins	L'occupant est bloqué jusqu'à ce qu'un chemin ne rencontre pas de zone à $S > 0,4$
Local $S > 0,5$ et $(H - E) < 1,2$	Interdit d'accès

Tableau 1 - Incidence de l'état de l'enfumage sur divers éléments d'une simulation EXITT.

Le tableau 2 donne un exemple des valeurs que peut prendre la vitesse de déplacement dans divers cas de figure, ces valeurs étant calculés sur une vitesse normale de déplacement supposée égale à 1,3 m/s.

	Vitesse de déplacement	
	<i>Occupant autonome seul</i>	<i>Occupant assistant - Occupant assisté</i>
Situation normale	1,3 m/s	0,65 m/s (50%)
Un local avec $S > 0,1$ a été rencontré	1,69 m/s (130%)	0,845 m/s
A l'intérieur d'un local avec $S > 0,4$	0,78 m/s (60%)	0,52 m/s

Tableau 2 - Vitesses de déplacement suivant le cas de figure, calculées sur la base d'une vitesse normale de 1,3 m/s.

Conclusion

EXITT, comme BFIREs, souffre des défauts inhérents à toute approche aspirant à modéliser le comportement humain: l'impossibilité de validation, ou même souvent de justification des hypothèses de travail. Citons quelques hypothèses non justifiées, voire non justifiables:

- le conditionnement de divers phénomènes à la variable S telle que celle-ci est définie;
- les divers seuils de valeur de cette variable S qui sont utilisés pour modifier ou commander certaines actions;
- les effets induits par l'atteinte de ces seuils (Ex.: pourquoi majorer la longueur d'un chemin passant par un local enfumé, pourquoi la majorer à partir de $S > 0,1$, et pourquoi la majorer forfaitairement de 200 mètres indépendamment de la valeur de S au-delà de 0,1?);
- la priorité des actions de l'occupant éveillé (indépendante de l'état de développement du feu);
- la valeur de la pénalité dans le cas du passage par une fenêtre (100 mètres);
- L'augmentation de la vitesse après avoir rencontré un local a $S > 0,1$;
- etc..

Ces défauts sont d'autant plus manifestes dans EXITT que ce modèle se veut parfaitement déterministe et ne permet ainsi aucune incertitude sur les résultats produits, comme si l'évacuation générée était la seule possible. A ces considérations il est nécessaire d'ajouter qu'EXITT n'intègre pas la modélisation d'un phénomène majeur concomitant à l'évacuation: les embouteillages et les problèmes d'encombrement qui se produisent inmanquablement dès que l'immeuble à évacuer

comprend une population importante. Il faut enfin signaler que de nombreux aspects du modèle demeurent assez mal éclairés dans la documentation existante.

L'intérêt majeur que présente EXIT réside dans le fait qu'il s'agit du seul modèle à pouvoir recevoir en entrée des résultats en provenance d'un modèle physique de feu, et d'introduire des règles de comportement, aussi imparfaites soient-elles, en fonction des données du modèle physique. En ce sens, il s'agit d'un des rares modèles qui génère un scénario d'évacuation conditionné par l'état de développement de l'incendie, et non pas décorrélé de la cause qui provoque l'évacuation.



III.11. EXIT89 (1991-?) et codes de calcul dérivés de Predtechenskii

La méthode de calcul semi-empirique de Predtechenskii-Milinskii, longue et fastidieuse à appliquer manuellement, a fait l'objet de nombreuses adaptations informatiques, et, plus généralement, a constitué la base au développement de nombreux codes de calcul.

Le nombre élevé d'adaptations s'explique par le fait qu'une transcription informatique fidèle de la méthode russe, dont les règles sont relativement simples, est une tâche beaucoup plus compliquée qu'il n'y paraît. A titre indicatif l'adaptation réalisée par Lardeux¹²⁵, qui paraît indiscutablement la plus fidèle, et que nous présentons au sous-chapitre suivant, a nécessité 4500 lignes de programmation en langage C pour le calcul de l'évacuation seul, c'est à dire déduction faite de l'interface de saisie. Un des problèmes principaux concerne la difficulté de représentation et de gestion de l'évolution temporelle d'un nombre important d'événements critiques (début ou fin de formation d'une zone saturée, fusion de deux flots,...), pouvant avoir lieu simultanément dans plusieurs "conduits" du réseau d'évacuation.

En conséquence, les approches ayant exploité les travaux des Soviétiques Predtechenskii et al se différencient notablement, tant par la liberté prise par rapport à la méthode, que par les techniques utilisées.

Les trois premiers travaux ont été menés vers 1985:

1. Sarrat¹²⁶ a réalisé une première "utilisation" informatique des travaux russes, pour l'étude de l'évacuation d'un hypermarché.

¹²⁵ Ce travail a été accompli dans le cadre du développement du logiciel Agora, également présenté dans ce sous-chapitre.

¹²⁶ [SARRAT]

2. Anne-Marie Majou du CSTB¹²⁷ et Ezel Kendik¹²⁸ ont réalisé (séparément) à peu près à la même époque, une version informatisée de la méthode de Predtechenskii et al permettant de traiter le cas des bâtiments compartimentés à plusieurs niveaux. La deuxième approche présentait également l'avantage d'être accompagnée d'une étude de validation, à partir d'observations d'évacuations.

Une autre proposition inspirée des travaux soviétiques a vu récemment le jour: il s'agit de EXIT89¹²⁹, mis au point par R.Fahy de la *National Fire Protection Association*, et dont le développement n'était pas achevé en 1991.

La conception de ce nouveau modèle a été lancée dans l'intention de fournir une solution alternative par rapport à EXITT¹³⁰, pour la simulation de l'évacuation d'un bâtiment, à l'intérieur du logiciel intégré HAZARD I. La motivation était de remédier à l'impossibilité de traiter avec EXITT le cas des bâtiments densément peuplés.

Les caractéristiques principales de EXIT89 sont les suivantes:

1. La modélisation de la géométrie est basée sur un schéma classique de réseau. Chaque noeud est décrit par la surface au sol du local, la hauteur sous plafond et le nombre d'occupants à l'instant initial. L'information fournie pour les arcs concerne la distance entre noeuds mis en liaison, et la largeur de la restriction.
2. Comme EXITT, EXIT89 est conçu pour recevoir en entrée des données en provenance de FAST. La prise en compte des effets de l'enfumage se limite au "blocage" du noeud pour lequel la variable S (définie de manière identique que dans EXITT) dépasse la valeur de 0,5. Les occupants se trouvant dans ce noeud à l'instant du "blocage" sont considérés comme ayant péri.
3. En tant que modèle destiné à collaborer avec FAST et par conséquent à prendre en compte l'éventualité de blocages isolés d'occupants, EXIT89 se devait d'être une approche microscopique.
4. Les chemins d'évacuation sont établis à partir d'une logique de distance minimale jusqu'à la cage d'escalier la plus proche, et non pas au sens de la distance minimale totale jusqu'à la sortie finale du bâtiment. Un occupant empruntant une cage d'escalier la suivra jusqu'à la fin, sauf si elle vient à être bloquée par l'incendie.

¹²⁷ [MAJOU 85]

¹²⁸ [KENDIK 85], [KENDIK 86]

¹²⁹ [FAHY 91]

¹³⁰ Voir §III.10 de ce chapitre.

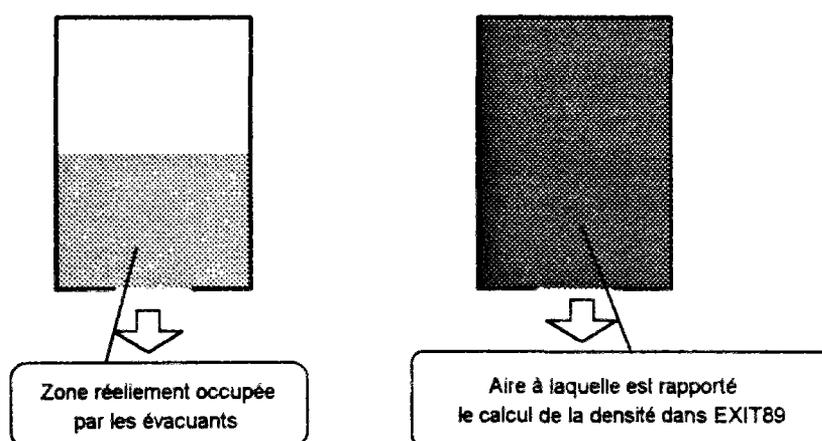
5. Les vitesses de déplacement sont calculées à partir des lois de Predtechenskii et Milinskii et des densités d'occupation.

L'ambition de l'auteur est d'enrichir EXIT89 en introduisant des aspects comportementaux, et en modélisant le cas des personnes assistées/assistantes.

Commentaire sur EXIT89

Un examen plus profond d'EXIT89 amène à constater qu'il ne s'agit pas véritablement d'une adaptation des travaux de Predtechenskii et Milinskii, puisque de cette méthode l'auteur n'a retenu que les lois de variation de la vitesse en fonction de la densité, et a omis tous les aspects concernant le traitement des débits dans les voies d'évacuation, la conservation des débits, la formation de bouchons, des confluences, etc...

Ceci se reflète également dans le fait que seule la surface des locaux est exigée en entrée (et non pas la longueur et largeur), étant donné qu'aucun calcul de débit d'évacuation n'est effectué dans l'approche retenue. Or, ceci entraîne d'autres problèmes majeurs: étant donné que les occupants ne sont pas modélisés comme des paquets à densité uniforme et de largeur et longueur données (comme le voudrait la méthode russe), le modèle ne peut pas savoir quelle est la surface réellement occupée par les individus, et est contraint de calculer la densité d'occupation en ramenant le nombre d'occupants à l'aire totale du noeud (comme l'illustre la figure ci-dessous)¹³¹. L'erreur de calcul peut être importante (consulter également à ce propos l'annexe 2).



¹³¹ Nous verrons plus loin qu'un problème analogue se pose avec le modèle EVACSIM.

Cependant, le modèle étant encore en cours de développement, il est nécessaire d'attendre sa version finale avant de pouvoir exprimer un avis définitif sur EXIT89.

III.12. AGORA (1990-92)

Le travail de thèse d'Emmanuel Lardeux¹³² a abouti en 1992 à la proposition d'un outil logiciel fini AGORA, dédié à l'étude du mouvement de personnes. Il s'agit d'un environnement informatique de qualité quasi professionnelle (programmé en C sous Windows pour ordinateur de type compatible PC), comprenant notamment:

- des utilitaires de saisie et de description des configurations étudiées,
- une panoplie d'approches pour le calcul de l'évacuation, depuis de simples formules empiriques, jusqu'à des codes de calcul basés sur les files d'attente,
- de nombreux utilitaires périphériques (calcul de *routages*¹³³, etc...).

Description de l'environnement

Un aspect original dans le travail de Lardeux consiste en la possibilité, à partir d'une description unique de l'environnement, de traiter selon plusieurs approches le problème de l'évacuation. Le principe d'une description unique connaît bien sûr certaines limites puisque chaque méthode ou modèle utilise en réalité des données qui lui sont propres. Ceci signifie que certaines approches ont besoin de données complémentaires et/ou n'utilisent pas tous les éléments de description de base de l'environnement. Ce qui demeure commun à toutes les approches est la décomposition de l'environnement en un réseau particulier constitué de *blocs* et de *liens*. Le terme de bloc est utilisé par l'auteur pour signifier qu'il ne s'agit pas d'un noeud classique, mais bel et bien d'un élément possédant deux dimensions et une orientation. AGORA propose à l'utilisateur trois modes de saisie:

- Par fichier-tableau: les lignes correspondent aux blocs, les colonnes à des descripteurs de ces blocs.
- Par langage de description, les règles syntaxiques duquel sont simples.
- Par un interfaçage avec une base de donnée du type DBase: le site modélisé est une base de donnée, dont chaque fiche contient la description d'un bloc.

A un découpage de la géométrie en blocs (qui n'est d'ailleurs pas unique), il est possible de faire correspondre plusieurs réseaux de liens selon des logiques

¹³² [LARDEUX 90a], [LARDEUX 90b], [LARDEUX 91], [LARDEUX 92]

¹³³ Nous verrons plus loin ce que Lardeux désigne par ce terme.

différentes. Il est à noter que les liens n'ont pas d'attribut de longueur, les distances étant intégralement prises en compte dans la description du bloc.

Une description exhaustive de l'environnement consisterait à introduire tous les liens physiques réellement existants. Cependant, dans la plupart des cas il est nécessaire que la description des liens compose un "routage" correspondant à une stratégie d'évacuation des lieux: les liens introduits indiquent les cheminements que devront suivre les occupants. Un routage est réalisé en omettant certains liens physiques, et/ou en indiquant les *proportions* ou *probabilités* de répartition en cas de bifurcation.

Basé sur cette description de la géométrie, l'auteur propose une série d'approches que nous décrivons dans ce qui suit.

"Modèles Statistiques"

Sous ce vocable sont regroupées un ensemble de formules empiriques permettant d'obtenir une première estimation du problème de l'évacuation dans le site étudié. Ces formules proviennent des travaux des soviétiques Predtechenskii et Milinskii et d'une version simplifiée de la formule de Togawa. Elles peuvent être utilisées sous deux formes: *sans routage* et *avec routage*. Par exemple, la formule *Temps Intrinsèque sans routage* que propose AGORA n'est rien d'autre qu'une division de l'effectif total, par la capacité totale des issues, effectuée à l'aide des grandeurs et données de la méthode russe. Cette même formule *avec routage* correspond au maximum sur toutes les issues de la division (effectif de l'issue i / capacité de l'issue \hat{i}). Dans ce cas, la répartition de l'effectif par issue découle du routage introduit par l'utilisateur, ce qui signifie également qu'à chaque routage correspond un *Temps Intrinsèque* différent. Les temps *avec* et *sans routage* seront en l'occurrence égaux si les occupants sont répartis au prorata de la largeur des issues.

AGORA fournit des utilitaires permettant de générer automatiquement certains types de routages: routage optimisant les distances à parcourir, routage aléatoire, routage à *répartition déterministe* (à nombre d'occupants prédéterminé par l'utilisateur pour chaque sortie).

"Modèle Fluidique Déterministe"

Cette appellation recouvre en fait une version informatisée, probablement la meilleure existante, de la méthode de calcul proposée par Predtechenskii et Milinskii. Dans la

réalisation informatique proposée, il est également possible d'introduire un temps de latence différent pour chaque bloc.

Cette contribution de Lardeux constitue un travail imposant (plus de 4500 lignes de langage C), qu'il a pu mener à bien grâce au fait qu'il s'est inspiré de la méthode de résolution graphique proposée par les auteurs. Ceci lui a permis de s'affranchir des difficiles problèmes de gestion de la variable temps: chaque "flot" d'occupants est représenté par deux segments de droite sur un graphe temps-espace. Les événements significatifs sont alors détectés en calculant des intersections de droites. AGORA offre la possibilité de visualiser ces segments de droite représentant chacun un flot d'occupant à la même densité.

Ce modèle a notamment servi de référence pour le développement des autres approches proposées par l'auteur.

"Modèle Sensibilité"

Lardeux a voulu dépasser le cadre de l'approche précédente en proposant un modèle intégrant les caractéristiques suivantes:

- microscopique,
- probabiliste,
- comportemental,
- et prenant en compte les phénomènes de congestion.

Les caractéristiques individuelles utilisées lors des simulations avec le modèle "sensibilité" sont les suivantes: la *surface projetée*, le *temps de latence* (grandeur aléatoire), le *coefficient de vélocité* par rapport à la vitesse normale (tiré aléatoirement selon plusieurs lois possibles), la *cible initiale* (sortie préférée), et le *critère de sensibilité* (nombre tiré aléatoirement selon plusieurs lois possibles dans l'intervalle $[0,1]$). Ce critère est utilisé lors des simulations quand la densité dans un bloc devient élevée (supérieure à un *seuil de densité* introduit par l'utilisateur): un tir aléatoire uniformément réparti sur $[0,1]$ est alors effectué. Si le nombre tiré est inférieur au *critère de sensibilité* l'occupant change de *cible*, en se redirigeant vers la cible la plus proche de la précédente. Cette possibilité de redirection en fonction de la densité constitue d'ailleurs la seule règle de comportement intégrée dans ce modèle.

La vitesse de déplacement est calculée à l'aide des lois de Predtechenskii, et le modèle étant cette fois-ci microscopique, il n'existe pas de paquets d'occupants à densité uniforme, c'est pourquoi la densité est rapportée à la surface totale du bloc.

D'autre part, la simulation étant événementielle et non à pas de temps, il aurait été difficile de réactualiser en permanence la vitesse de déplacement de chaque occupant en fonction de la densité. L'auteur a par conséquent choisi de maintenir la vitesse constante pendant la traversée de chaque bloc. La vitesse utilisée est celle correspondant à la densité d'occupation de l'instant d'entrée dans le bloc. Incidemment, ce choix, s'il ne constitue pas un mode exact de calcul de la vitesse, compense en contrepartie le phénomène d'accélération des occupants décrit en Annexe 2 dans le cas où la densité est rapportée à la surface totale du local.

Les essais effectués par Lardeux à l'aide de ce modèle ont montré qu'en annulant le caractère probabiliste de certaines grandeurs (sensibilité choisie nulle, etc...), on obtient des temps d'évacuation assez proches de ceux obtenus à l'aide du modèle "fluidique déterministe".

Réseaux de files d'attente

La contribution originale principale du travail de thèse de Lardeux concerne la modélisation de l'évacuation par files d'attente. Lardeux a entrepris d'apporter des améliorations substantielles aux techniques ayant recours aux réseaux de files d'attente pour le calcul des problèmes d'évacuation. Son projet initial consistait en l'élaboration d'un modèle intégrant les caractéristiques suivantes (par opposition à l'approche de MacGregor Smith):

- le débit des files d'attente varie en fonction de leur charge,
- ces files possèdent des capacités finies, compatibles avec la géométrie des lieux.

Pour la réalisation du premier objectif, deux approches principales ont été envisagées, faisant appel à des méthodes de résolution différentes.

1. **Régime stationnaire.** L'hypothèse de stationnarité signifie concrètement que le réseau de circulation est considéré fermé (à l'aide d'un bloc fictif): dès qu'un occupant a évacué, il est immédiatement réinjecté dans un des noeuds initialement occupés (au prorata des occupations initiales). Les occupants circulent ainsi dans le réseau depuis un temps suffisamment long, pour qu'un régime stationnaire se soit établi (vitesses et densités constantes dans le temps à chaque endroit de l'espace). Comme pour le modèle de MacGregor Smith la résolution du réseau est effectuée à l'aide de l'algorithme MVA (Mean Value Analysis). Deux solutions furent envisagées pour introduire la dépendance de charge. La première consiste à faire dépendre le débit de la densité d'occupation.

Les résultats étant médiocres, cette approche fut abandonnée en faveur de celle introduisant une dépendance du temps de traversée d'un bloc à partir de la vitesse de déplacement dans celui-ci, elle-même fonction de la densité (toujours à l'aide des lois de Predtechenskii). Dans les deux cas, dans l'impossibilité de distinguer des zones distinctes à la même densité à l'intérieur d'un seul bloc (comme avec le modèle de Predtechenskii), la densité utilisée est une valeur moyenne, calculée à partir de l'aire totale du bloc. Les résultats de cette deuxième version se révèlent optimistes par comparaison à ceux obtenus au moyen du modèle Predtechenskii. L'auteur a remarqué que les résultats divergeaient d'autant plus que la densité initiale était importante, et attribue ce phénomène au fait qu'en régime stationnaire il ne peut y avoir de blocage (sinon il serait permanent), et que souvent le débit dans la circulation dépasse le débit maximum selon Predtechenskii, bien que le calcul de vitesses soit basé sur les lois fournies par cette méthode. Nous avançons une explication sur ce phénomène en Annexe 2.

2. **Régime transitoire.** Une seconde approche, cette fois-ci en régime transitoire, a été élaborée par Emmanuel Lardeux afin de mettre en évidence les phénomènes instationnaires inhérents au mouvement de foule. Une méthode prédicteur-correcteur à pas de temps variable est utilisée pour résoudre un système de bilans décrivant la répartition des occupants dans tous les noeuds, ces bilans étant écrits en fonction des débits dans chaque bloc, eux-mêmes fonction de la densité supposée encore une fois uniforme. Les temps obtenus à l'aide de cette approche sont de 2 à 3 fois supérieurs à ceux fournis par Predtechenskii. L'auteur incrimine pour cela le mode de calcul de la densité (voir également note 1 de l'Annexe 2), et propose de remédier à ces mauvais résultats en modifiant les courbes $\text{débit} = f(\text{densité})$ utilisées.

Validation

Le mémoire de thèse décrivant AGORA présente également l'intérêt de comporter une étude de cas réel. En l'occurrence, il s'agit de 6 observations d'évacuation d'une salle de théâtre de 500 personnes environ. Les différentes approches proposées par AGORA y sont appliquées. Les meilleurs résultats sont obtenus à l'aide du modèle de Predtechenskii et de l'approche par réseau de files d'attente transitoire (avec courbes de débit modifiées). Le modèle par files d'attente en régime stationnaire donne des résultats très inférieurs aux observations.

Commentaires

Outre la qualité irréprochable de son interface logiciel, AGORA présente l'avantage de proposer de nombreuses approches alternatives de calcul d'évacuation (formules empiriques, Predtechenskii, files d'attente,...), à partir d'une description essentiellement commune.

Le travail d'Emmanuel Lardeux met en évidence certaines limites qu'il est possible d'atteindre avec une approche par réseau de files d'attente. A notre avis ces limites sont plus attribuables au mode de calcul de la densité dans une modélisation géométrique par réseau, qu'au recours-même aux files d'attente. En effet, l'hypothèse de densité uniforme dans chaque bloc -rapportée donc à la totalité de l'aire du bloc- conduit à des problèmes majeurs, et ce pour les deux versions de contrôle du mouvement que l'on peut imaginer (cf. Annexe 2):

1. Le mouvement est contrôlé par la vitesse = $f(\text{densité uniforme})$: la vitesse s'accroît lors du vidage progressif de l'élément de circulation, entraînant un dépassement du débit maximum et par conséquent à une estimation optimiste du temps nécessaire pour évacuer.
2. Le mouvement est contrôlé par le débit = $f(\text{densité uniforme})$: le débit diminue de manière exponentielle et tend asymptotiquement vers 0, en allongeant ainsi excessivement les temps d'évacuation (qui deviennent théoriquement infinis).

III.13. EVACSIM (1993-?)

EVACSIM¹³⁴ est un code de calcul très récent, encore en cours de développement en Norvège sous la responsabilité de Gunnar Løvås de l'Université d'Oslo. Il s'agit d'une approche systémique par réseaux de files d'attente stochastiques du problème de la modélisation de l'évacuation d'un bâtiment.

La *topographie* est représentée sous la forme classique d'un réseau d'arcs et de noeuds, lieu du déplacement des occupants.

- Chaque noeud ('room' selon l'auteur) correspond à un local du bâtiment (pièce ou couloir) et possède comme unique caractéristique, une "capacité", exprimée en nombre d'occupants, en adéquation avec les dimensions réelles de la salle correspondant à ce noeud. De plus, les noeuds du bâtiment sont

¹³⁴ [LØVAS 93a], [LØVAS 93b]

classés en trois catégories: noeuds de départ, noeuds intermédiaire et noeuds d'arrivée.

- Chaque arc ('door' selon l'auteur) relie deux noeuds entre eux et est censé correspondre à un passage de porte (restriction). Un arc est défini par les 2 noeuds qu'il relie, et la largeur de la restriction qu'il représente. Contrairement aux représentations habituelles, EVACSIM n'associe pas d'attribut de longueur aux arcs. Les distances géométriques sont intégrées à la description des noeuds via l'introduction de la longueur des sous-arcs reliant chaque noeud aux divers passages de portes auquel il est relié.

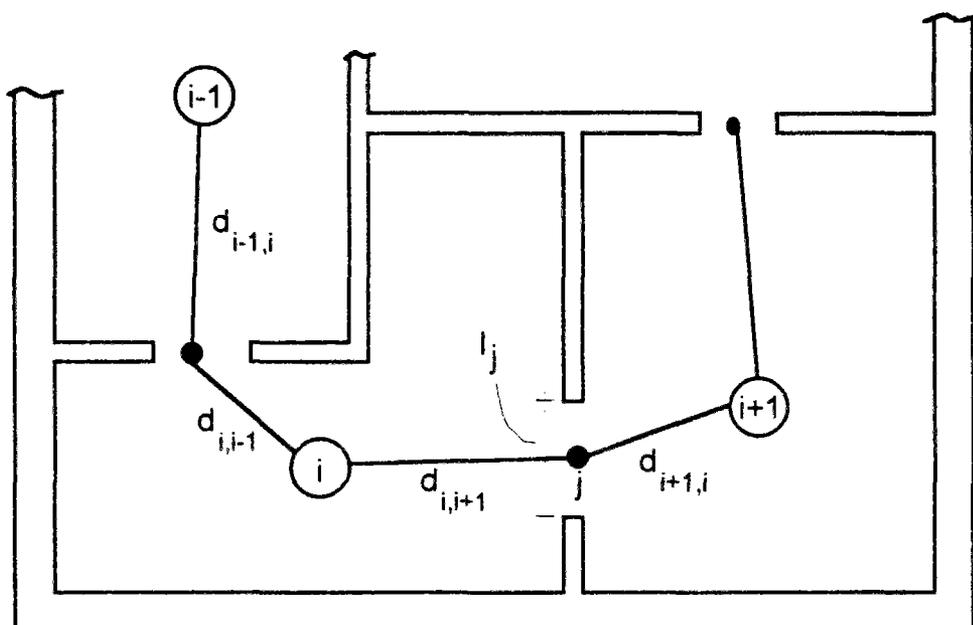


Fig. 43 - Modélisation de l'espace dans EVACSIM

Le **mouvement** de chaque occupant est simulé par un processus stochastique.

A la différence du modèle de Lardeux le **roulage** n'est pas introduit par l'utilisateur. L'**itinéraire** que suit chaque occupant pour atteindre son but de déplacement (habituellement une sortie) est établi de la manière suivante: à son arrivée à un noeud du réseau, l'occupant réalise un tir aléatoire afin d'élire le noeud adjacent du réseau vers lequel il va se diriger, ce tir étant pondéré par une probabilité de choix pour chaque noeud. Cette probabilité peut être calculée selon différents modes, dont la plupart sont censés favoriser le choix des itinéraires que l'auteur qualifie de "*perçus comme optimaux*". En ce point EVACSIM adopte un esprit proche de celui de BFIREs, pour lequel la probabilité de choix d'une case est inversement proportionnelle à la distance séparant celle-ci de la sortie.

Le **déplacement** d'un noeud à l'autre équivaut à un service dans le langage de la théorie des files d'attente, où le client est l'occupant, le serveur est le lien. Ce déplacement n'a lieu que si les conditions suivantes sont réunies:

- la capacité (en nombre de personnes par secondes) du lien permet de servir l'occupant en attente. A cet effet l'auteur utilise un débit maximal par mètre effectif (selon Pauls¹³⁵) d'ouverture F_m ,
- le noeud (pièce) aval n'est pas saturé.

La **durée** du déplacement de l'occupant k autour du noeud i est décomposée de la manière suivante:

- Il est possible d'introduire un temps de latence initial T_1 , qui est défini comme une grandeur probabiliste spécifique pour chaque occupant à partir d'une distribution probabiliste introduite par l'utilisateur. Ce temps de latence est utilisé si le noeud i est un noeud de départ.
- Si le noeud i n'est pas un noeud de départ, l'occupant se déplace depuis le passage précédent vers le centre du noeud i . La durée de ce déplacement est calculée de la manière suivante:

$$T_1 = d_{i1} / S_{ki}$$

où d_{i1} est la distance séparant le noeud i de la "porte" amont. La vitesse de déplacement S_{ki} est quant à elle une variable stochastique décrite à l'aide d'une distribution log-normale dont l'écart-type est une fonction décroissante de D_i , densité d'occupation du noeud i . Cette fonction est établie à partir de données bibliographiques. La valeur moyenne de la distribution log-normale correspond à la formule suivante: $m_{ki} = \min [S_{kc}, F_m/D_i]$ avec S_{kc} : vitesse de l'occupant en milieu libre (densité=0). L'esprit de cette formule est qu'il faut imposer une borne supérieure à la vitesse de déplacement (ou plutôt la valeur moyenne de cette vitesse) de manière à ce que le débit maximal ne soit jamais dépassé puisque :

$$F_m \geq F = S \cdot D_i$$

F_m : débit spécifique maximal en personnes/(m·s),

F : débit spécifique effectif en personnes/(m·s),

S : vitesse moyenne de déplacement,

D_i : densité en personnes/m².

¹³⁵ Voir §II.3.7 de ce chapitre.

S_{kc} : la vitesse de déplacement de l'occupant k à densité nulle, est à son tour une variable stochastique, déterminée pour chaque occupant en début de simulation, et décrite par une distribution log-normale de valeur moyenne et écart-type puisés dans les données statistiques disponibles dans la littérature. Il est possible de définir plusieurs catégories d'occupants, avec des valeurs caractéristiques différentes de la distribution log-normale, pour tenir compte des spécificités de la population (sexe, âge, mobilité).

- Si le noeud i n'est pas un noeud d'arrivée, l'occupant se déplace depuis le centre du noeud vers le passage aval; la durée de ce déplacement est:

$$T_2 = d_{i2} / S_{ki}$$

où d_{i2} est la distance séparant le noeud i de la "porte" aval.

- Il est possible que l'occupant soit immobilisé pendant T_3 secondes au noeud i en l'attente d'être servi.
- Quand la personne est servie, elle occupe le serveur pendant:

$$T_4 = 1 / (b \cdot F_m)$$

où b : largeur du passage.

Après un laps de temps $T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4$, l'occupant disparaît du noeud i et est considéré déplacé au noeud suivant.

La simulation dans EVACSIM est réalisée à l'aide de l'utilitaire QNAP2 (Queueing Network Analysis Package). Le mouvement de chaque personne est modélisé en tant que processus stochastique séparé, toute les processus interagissant entre eux au niveau de la disponibilité des serveurs, du calcul des vitesses (via la densité), et de la saturation éventuelle des noeuds. Le principe consiste à réaliser un grand nombre de simulations, afin de procéder par la suite aux traitements statistiques nécessaires.

Commentaires

EVACSIM se présente comme une proposition complète en matière de simulation des mouvements de personnes.

- Du point de vue informatique, son interface bénéficie d'une qualité de niveau professionnel, puisqu'il est fait appel à une société de service française pour le développement des interfaces d'entrée-sortie.
- EVACSIM a l'ambition d'intégrer, parmi ses caractéristiques, une gamme étendue de phénomènes relatifs et corollaires à l'évacuation d'un bâtiment:

variabilité des facultés des occupants, temps de latence, processus décisionnels d'identification de l'itinéraire d'évacuation, phénomènes de congestion et de variation de la vitesse en fonction de la densité d'occupation.

Quelques remarques peuvent cependant être émises à l'égard de cette proposition:

- De même que pour les autres modèles ayant fait le même choix, la description de la géométrie du bâtiment à l'aide d'un réseau rend difficile la modélisation des configurations pour lesquelles la géométrie est complexe et ne peut être ramenée à de simples pièces ou couloirs reliés par des passages entre eux (cas des grandes salles, centres commerciaux, grands magasins).
- A partir des documents dont nous avons pu disposer, il n'est pas possible de former une opinion sur la procédure d'élection du chemin d'évacuation. Le caractère probabiliste de ce choix, combiné au fait que cette procédure est réitérée de proche en proche, à chaque nouvelle arrivée de l'occupant à un noeud, suscite quelques inquiétudes, notamment suite à l'expérience des conséquences que le choix probabiliste du chemin à chaque nouveau pas engendre dans BFIREs. En d'autres termes, le problème est de savoir si cette procédure génère des itinéraires vraisemblables, et sans trop d'oscillations¹³⁶.
- Nous n'avons pas eu entre nos mains de résultats d'étude, sinon de validation, au moins d'évaluation des résultats de simulation, permettant notamment de juger de la pertinence de la description des phénomènes de congestion à l'aide de files d'attente stochastiques appliquées sur un réseau. Il est clair que la représentation des phénomènes de variation continue de la vitesse de déplacement, due aux variations de densité, sous le schéma discret: attente (vitesse nulle), service (vitesse constante), nécessite une démonstration.
- Qui plus est, le mode de calcul de la vitesse de déplacement à l'intérieur d'un noeud semble présenter certaines faiblesses.

1. Rappelons que la vitesse provient d'une distribution log-normale de valeur moyenne: $m_{ki} = \min [S_{kc}, F_m/D_i]$

¹³⁶ Voir §III.2 de ce chapitre, en particulier le paragraphe "Discussion sur les aspects cinématiques".

Prenons des valeurs classiques:

$$S_{kc} \approx 1,30 \text{ m/s, et}$$

$$F_m \approx 1,5 \text{ personnes/(m}\cdot\text{s)}$$

Nous obtenons alors les courbes suivantes pour les valeurs moyennes de la vitesse et du débit:

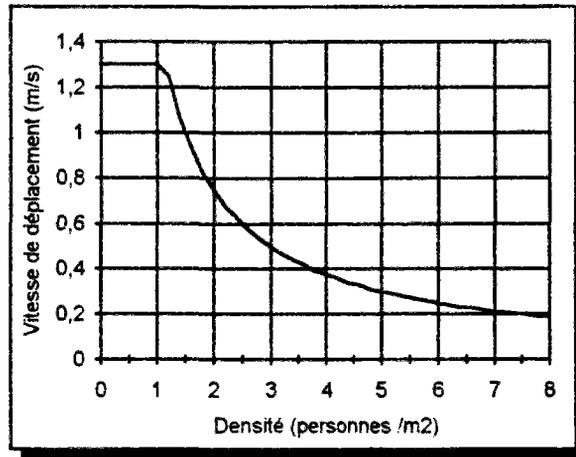


Fig. 44 - Evolution de la valeur moyenne de la vitesse en fonction de la densité

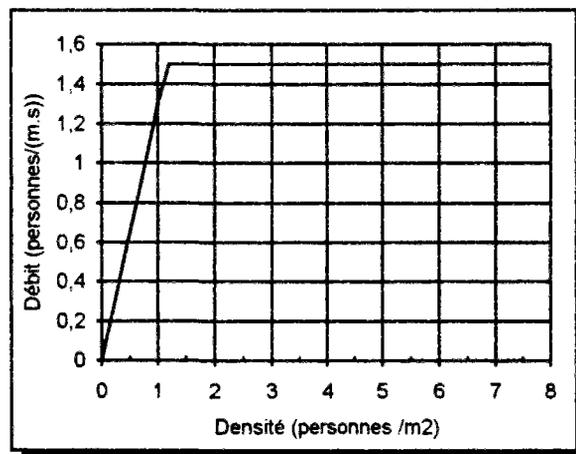


Fig. 45 - Evolution de la valeur moyenne du débit spécifique en fonction de la densité

En d'autres termes, l'auteur adopte une hypothèse de variation hyperbolique de la moyenne de la vitesse en fonction de la densité, ce qui signifie implicitement que l'on suppose que le débit est constamment maximal, sauf pour les très faibles densités. Les deux courbes précédentes sont assez éloignées des données d'observation disponibles dans la littérature. Il est cependant probable qu'il existe une justification valable de ce choix, mais qui malheureusement ne figure pas dans les documents dont nous avons disposé.

2. L'hypothèse de conditions homogènes à l'intérieur de chaque local-noeud, autorisant le calcul d'une densité unique, doit logiquement poser quelques problèmes, comme pour tous les autres modèles adoptant la même hypothèse. Illustrons encore une fois le biais qui peut être introduit par cette hypothèse, en examinant l'exemple d'application d'EVACSIM que présente l'auteur dans la référence [LØVÁS 93a].

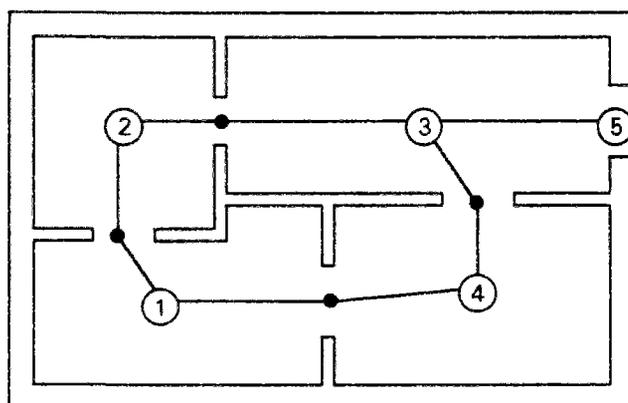


Fig. 46- Schéma du bâtiment et du réseau associé

Supposons qu'à l'instant initial $t=0$, 50 occupants initialement situés dans le local 1 se mettent en mouvement en direction de la sortie 5 [Fig. 47].

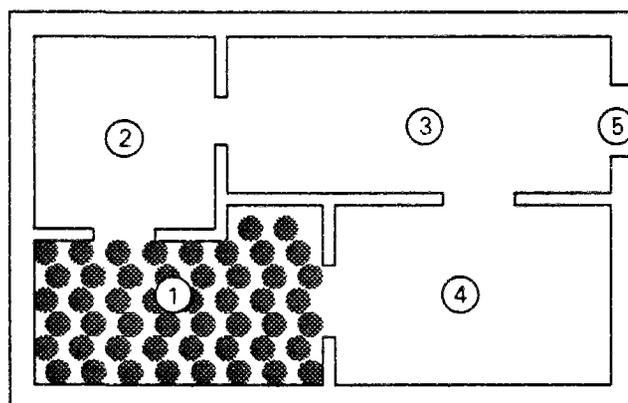


Fig. 47 - Situation à $t=0$ secondes

A un instant donné $t>0$ une situation qualitative vraisemblable est celle présentée à la figure 48.

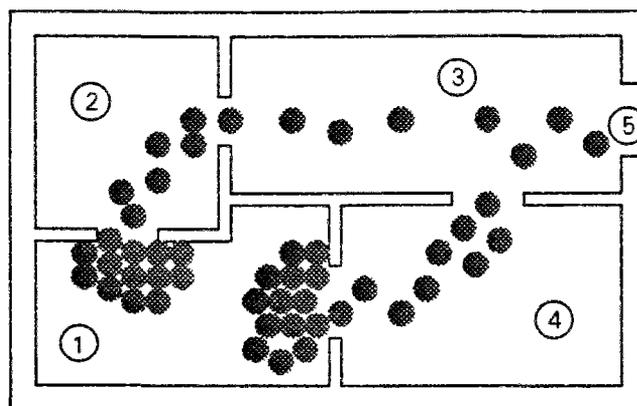


Fig. 48 - Situation probable à un instant $t > 0$ secondes

Les variations locales de densité dans le local 1 sont très fortes, avec des pics élevés de densité près des issues, et une densité moyenne relativement faible. De cette dernière valeur, il résulte dans EVACSIM une moyenne de la vitesse de déplacement assez élevée. Ceci ne paraît pas très préjudiciable dans la mesure où les phénomènes de congestion seront quand même pris en compte dans EVACSIM au niveau de l'attente de disponibilité des serveurs (portes). Ce qui semble plus grave est le fait que la moyenne de la vitesse de déplacement dans les locaux 2, 3 et 4 (que les occupants ne font que traverser) soit calculée à partir d'une densité unique pour chaque local, rapportée à l'aire totale de la pièce. Or, il est évident qu'indépendamment des dimensions du local (celui-ci pourrait être infiniment grand), seul un étroit "tube de circulation" est utilisé par les occupants, tant qu'il n'y a pas saturation des éléments de circulation du réseau qui se trouvent en aval (porte, pièce suivante). Ceci peut conduire à une erreur de surestimation très importante de la vitesse.

Comparaison avec AGORA

Il est intéressant de comparer les approches par files d'attente proposées dans AGORA (régime transitoire) et EVACSIM. La modélisation décrite dans AGORA paraît beaucoup plus simple: le mouvement ne dépend que d'un temps de service, qui est fonction du débit. Dans EVACSIM le temps de traversée contient plusieurs composantes: un temps de service dépendant de la capacité du passage, mais aussi un temps de déplacement d'un passage à l'autre à vitesse dépendant de la densité, et enfin un temps d'attente éventuellement imposé par une saturation de la capacité statique des noeuds. Ces deux dernières composantes ne figurent pas dans AGORA. Par contre, la forme de la courbe simplifiée de débit en fonction de la densité utilisée par Løvås ressemble étrangement à celle de la courbe corrigée par Lardeux pour

pallier le problème de la diminution du débit dû à la diminution de la densité moyenne (et non locale).

Conclusion

En définitive, EVACSIM présente l'indéniable mérite d'être le produit d'une des approches les plus sérieuses ayant recours à des processus stochastiques appliqués sur un réseau de files d'attente, pour la description du mouvement de foules. Il s'agit certainement d'une voie très intéressante qui mériterait un effort substantiel pour une meilleure prise en compte des phénomènes de variation de la vitesse en fonction de la densité, notamment dans les espaces libres puisque, pour les restrictions, la modélisation paraît beaucoup plus pertinente.

III.14. Synthèse sur les modèles existants

Nous avons vu au cours de ce chapitre que la modélisation et simulation du mouvement de personnes a suscité un développement impressionnant d'approches et de techniques: simulations à pas de temps, simulation événementielle, modèles probabilistes, processus stochastiques, programmation linéaire,... Ceci n'est pas étonnant dans la mesure où ces modèles sont appelés à répondre à des questions différentes: comportement humain, faible densité, assistance, enfumage,... On remarque également un regain d'activité de modélisation ces dernières années, et particulièrement pour le cas des hautes densités (EXIT89, AGORA, EVACSIM).

Un élément commun à toutes les approches (sauf une) est la représentation nodale de l'environnement. Ce choix semble poser des problèmes si le modèle aspire à reproduire des phénomènes d'encombrement qui dépendent de la densité. Les seuls modèles effectuant un calcul cohérent de la densité sont ceux directement dérivés de la méthode proposée par Predtechenskii et Milinskii. Mais ces approches ne sont pas microscopiques et s'appuient elles-aussi sur une description par réseau.

Dans le chapitre suivant, où nous présentons les principes généraux du modèle proposé dans cette thèse, nous examinerons plus en détail certaines caractéristiques des modèles, par rapport au but de cette étude.

CHAPITRE 3 :
METHODOLOGIE ET ELEMENTS
D'UNE DEMARCHE DE
MODELISATION DU MOUVEMENT
DE PERSONNES

I. AVANT-PROPOS

Lors de l'analyse bibliographique assez exhaustive que nous avons présentée au chapitre précédent, nous avons mis en évidence les qualités et lacunes des différentes approches existantes en matière de modélisation de l'évacuation d'un bâtiment. Il est nécessaire à présent de réexaminer ces aspects sous le prisme du but fixé pour ce travail de thèse.

Rappel du but

L'objectif de cette thèse consiste en l'élaboration d'un modèle et d'un code de simulation du mouvement des personnes évacuant un bâtiment, adapté au cas des environnements complexes abritant des concentrations élevées d'occupants (grandes salles, grands magasins, Etablissements Recevant du Public plus généralement). En conséquence, le modèle élaboré devra répondre à deux exigences principales:

1. Il devra prendre en compte les phénomènes de congestion et de variation de la vitesse de déplacement des occupants en fonction de la densité, phénomènes dominants en présence de population dense.
2. Il devra être applicable quelle que soit la géométrie, et donc en particulier dans le cas des configurations géométriques complexes, "ouvertes", "floues" avec obstacles...

Aspects non modélisés

Rappelons également que ce travail n'a pas l'ambition d'aboutir à un modèle reproduisant les aspects comportementaux complexes qui peuvent se manifester au cours d'une évacuation, suite à la déclaration d'un incendie. Cette restriction dans les hypothèses de travail, que nous analyserons plus loin dans ce chapitre, est assez cohérente avec l'orientation du modèle vers le cas du mouvement de foule dense, pour lequel:

- les comportements présentent beaucoup moins de disparité, pour plusieurs raisons exposées au premier chapitre,
- ces comportements ont de toute façon peu d'influence sur l'image générale de l'évacuation, dont l'aspect dominant sera celui du développement de phénomènes de congestions dus à la densité d'occupation.

Il est également nécessaire de préciser que le modèle proposé n'intègre pas de représentation du feu, ni des effets éventuels de celui-ci sur le déroulement de l'évacuation et les personnes en mouvement. Deux raisons principales nous ont contraint à cette limitation:

1. La modélisation du mouvement de personnes à haute densité s'est révélée suffisamment compliquée pour ne pas permettre, dans le cadre d'une thèse, d'examiner les aspects, certes importants mais non moins complexes, des interactions feu-évacuation. A titre d'exemple montrant cette complexité, l'impraticabilité d'une voie d'évacuation est susceptible d'entraîner une décision de changement de direction d'un occupant, et/ou l'incapacitation partielle ou totale de celui-ci; de même, l'ouverture ou non d'une porte par un occupant au cours de son cheminement d'évacuation induira des modifications sur la circulation des fumées dans le bâtiment, ou peut-être sur le développement du feu lui-même.
2. Ni les modèles de feu existants, ni le modèle d'évacuation que nous proposons ne se trouvent à un stade de développement et de précision offerte dans la représentation des phénomènes modélisés suffisant pour justifier un fonctionnement couplé. Il n'est pas toujours pertinent de vouloir coupler systématiquement des outils de prédiction dont les résultats présentent nécessairement des marges d'incertitude élevées. Il est préférable que l'expert mette à profit en parallèle les différentes approches traitant d'aspects particuliers d'un problème plus global, en filtrant, évaluant et éventuellement pondérant les résultats en provenance de chacune d'entre elles.

Il sera cependant possible, à l'aide du modèle proposé, d'examiner certains couplages élémentaires, comme par exemple déclarer une zone du bâtiment sinistrée et examiner les effets induits sur le processus d'évacuation. Mentionnons également à titre d'exemple que ce travail a permis, dans le cadre d'un contrat industriel réalisé par la division STE (Sollicitations Thermiques et Enfumage) du Service Sécurité Feu du CSTB, d'avoir recours dans un seul et même projet à des procédures réglementaires, des mesures expérimentales, des calculs de mouvement de personnes et d'éclairage énergétique reçu par les évacuants.

II. EXAMEN DES APPROCHES EXISTANTES PAR RAPPORT AU BUT RECHERCHE

Nous allons analyser dans ce sous-chapitre la difficulté de traiter les configurations retenues avec les approches existantes, et plus précisément avec celles modélisant des phénomènes d'encombrement.

Plusieurs types de modèles intègrent ces phénomènes. Le tableau suivant peut nous aider à comparer leurs caractéristiques.

Modèle	Type de modèle	V = f (D) ? <i>Si oui: Aire retenue pour le calcul de la densité</i>	Limitations des débits d'évacuation aux restrictions
<i>EMBER</i>	Réseau de noeuds "ponctuels"	oui surface du noeud	-
<i>MacGregor Smith</i>	Réseau de files d'attente	-	Temps de service indépendant de la charge ^[a]
<i>Kendik / Majou</i>	Réseau de noeuds "rectilignes"	oui surface du "flot"	oui
<i>Takahashi-Tanaka</i>	Réseau d'éléments	-	oui
<i>EXIT89</i>	Réseau de noeuds "ponctuels"	oui surface du noeud	-
<i>AGORA / Predtechenskii</i>	Réseau de noeuds "rectilignes"	oui surface du "flot"	oui
<i>AGORA / Sensibilité</i>	Réseau de noeuds "ponctuels"	oui surface du noeud	-
<i>AGORA / Files d'attente stationnaire</i>	Réseau de files d'attente (noeuds)	oui surface du noeud	Temps de service dépendant de la charge ^[b]
<i>AGORA / Files d'attente transitoire</i>	Réseau de files d'attente (noeuds)	-	Temps de service dépendant de la charge ^[c]
<i>EVACSIM</i>	Réseau de files d'attente (noeuds)	oui surface du noeud	Temps de service indépendant de la charge ^[d]

^[a] L'utilisateur peut introduire un temps de service moyen, en adéquation avec la capacité du passage

^[b] Le temps de service dépend de la vitesse, qui est fonction de la densité

^[c] Le temps de service dépend du débit, qui est fonction de la densité

^[d] Le temps de service dépend de la capacité du passage

Tableau 3 - Comparaison entre les modèles présentant des caractéristiques visant à reproduire les phénomènes liés au déplacement de foule dense.

Les difficultés de représentation du mouvement de personnes à haute densité en environnement géométrique (architectural) complexe à l'aide de ces approches s'expriment à travers deux aspects étroitement liés: le support géométrique du modèle, et le mode de prise en compte de la variation de la vitesse.

Représentation de l'environnement par réseau

Dans les modèles existants, la représentation du bâtiment s'appuie toujours sur un modèle "nodal". Ceci soulève plusieurs problèmes à différents niveaux:

- Comment, par exemple, découper un plan architectural complexe en espaces élémentaires?

A supposer que ce découpage soit réalisable:

1. Comment faire abstraction du mouvement à l'intérieur du volume-
"noeud"?
2. Que représenteraient dans ce cas les arcs qui ne correspondraient pas à un passage réel ou une restriction?

Nous verrons plus loin que ces questions ne se posent pas exactement dans les mêmes termes dans le cas particulier des réseaux à éléments rectilignes.

Modèles sans vitesse variable¹³⁷

Pour celles des propositions qui n'intègrent pas de variation de la vitesse en fonction de la densité, il est nécessaire de signaler que la validité de l'approche retenue pour la modélisation des phénomènes de congestion n'a pas été établie, notamment pour ce qu'il s'agit des réseaux de files d'attente.

Modèles à noeuds "ponctuels"

Pour les modèles aspirant à intégrer la variation de la vitesse en fonction de la densité, il faut tout d'abord distinguer le cas des modèles qui se contentent de décrire chaque local comme un simple "point", auquel est rattachée toute l'aire du local, la position exacte des occupants à l'intérieur du local demeurant indéterminée. Le calcul de la densité ne peut donc que s'appuyer sur la surface totale du local. Nous avons montré lors de l'examen de ces modèles que l'erreur commise pouvait être importante (cf. Annexe 2). Ceci annule en grande partie l'avantage qu'est censé représenter la prise en compte d'une vitesse variable.

¹³⁷ Ce terme est préférable à celui de "vitesse constante", car la vitesse peut ne pas apparaître du tout dans certains de ces modèles.

Réseaux d'éléments "rectilignes"

Les modèles qui semblent théoriquement les plus aptes à représenter les phénomènes d'encombrement et d'embouteillage sont ceux qui suivent le plus fidèlement possible la méthode proposée par Predtechenskii & Milinskii. Nous pouvons émettre les remarques suivantes à propos de cette catégorie de modèles :

1. La modélisation de la géométrie est cette fois-ci un peu plus fine, puisque chaque volume-noeud du réseau du bâtiment est désormais représenté comme un "canal" possédant deux dimensions, une *largeur* et une *longueur*. Il est par conséquent possible de connaître les limites dans le sens de la longueur (celui du déplacement) de chaque flot d'occupants, et de procéder à un calcul "exact" (ou plutôt cohérent par rapport à la méthode) de la densité.
2. Mais chaque noeud-élément de circulation est orienté, et le mouvement ne peut se dérouler que dans la direction de l'axe que détermine le descripteur *longueur* de l'élément. C'est pourquoi nous parlons de *réseau de canaux*.
3. Le problème de la représentation de l'environnement sous forme de réseau se pose alors à nouveau, mais sous la forme suivante :
 - *Il est très difficile de ramener un environnement géométrique complexe à des éléments de mouvement rectilignes, alors que nous ne connaissons pas a priori la direction des déplacements des individus dans cet environnement. Il est à noter que l'obligation de modéliser l'environnement à l'aide d'éléments rectilignes découle, entre autres, de la nature même des mesures qui servent d'appui au développement de ces modèles: les mesures vitesse-densité sont nécessairement réalisées dans des éléments de circulation rectilignes.*

En d'autres termes, ce qui pose problème, c'est l'obligation de découper l'espace en éléments, de deux dimensions certes, mais pour lesquels le sens du mouvement est figé, et qui ne peuvent être connectés entre eux que selon deux côtés opposés. Un tel découpage se révèle souvent impossible même sur des cas d'immeubles de taille moyenne (et non seulement pour les ERP de grande taille) comportant, par exemple, des locaux dont la plus grande des deux dimensions est perpendiculaire au mouvement, ou dont l'une des deux dimensions n'est pas sensiblement différente de l'autre, ou encore possédant éventuellement plus d'une sortie... (Voir figure 49)

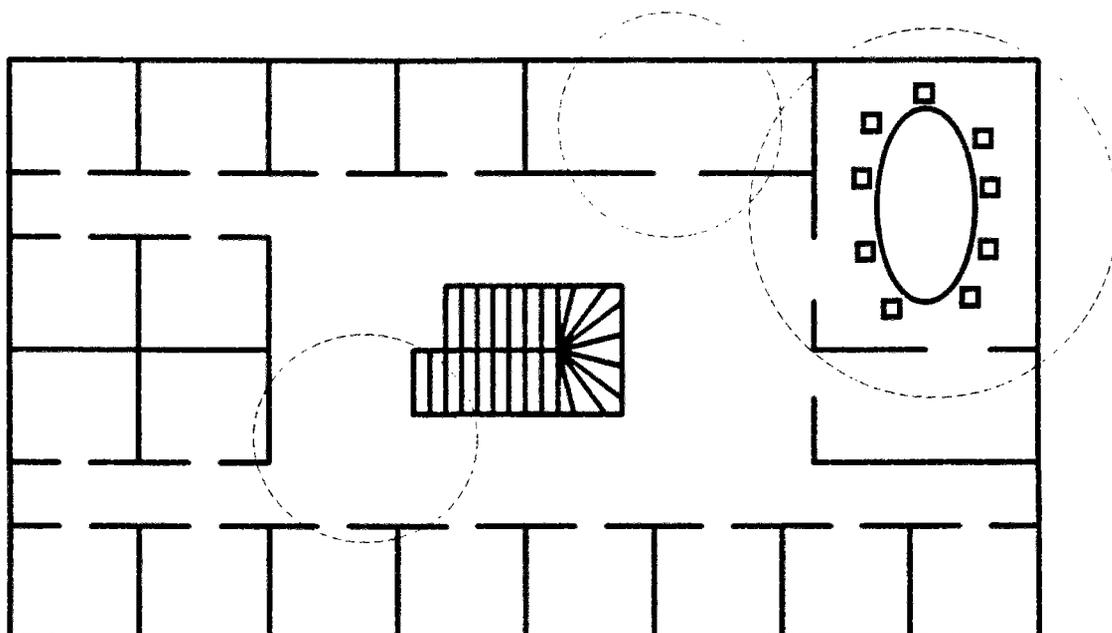


Fig. 49 - Exemple simple de plan d'étage difficile à transcrire sous la forme de réseau de canaux (figure extraite de la thèse de Lardeux). (Les cercles désignent des exemples de régions particulièrement difficiles à "découper" en éléments rectilignes).

Pour finir, nous pouvons également schématiser le problème de la représentation de l'environnement sous la forme suivante (voir figure 50):

- Il existe des représentations, que l'on désignera réseaux "d'ordre 0" ou encore "ponctuels", pour lesquels le centre de chaque noeud est relié au centre d'un ou plusieurs noeuds avoisinants.
- Il existe des réseaux "d'ordre 1" (ou réseaux à noeuds "rectilignes", ou encore "réseaux de canaux") pour lesquels chaque élément possède deux dimensions, un axe privilégié correspondant au sens de déplacement des occupants (et implicitement à la plus grande des deux dimensions de l'élément), et dont les deux côtés perpendiculaires à cet axe peuvent être reliés à d'autres éléments du réseau.
- Ces représentations étant insuffisantes dans le cas des configurations géométriques complexes, il est nécessaire de passer à la dimension supérieure: le mouvement doit pouvoir avoir lieu dans n'importe quelle direction du plan (non connue préalablement), et chaque élément doit pouvoir être connecté selon tous les côtés qui délimitent sa frontière.

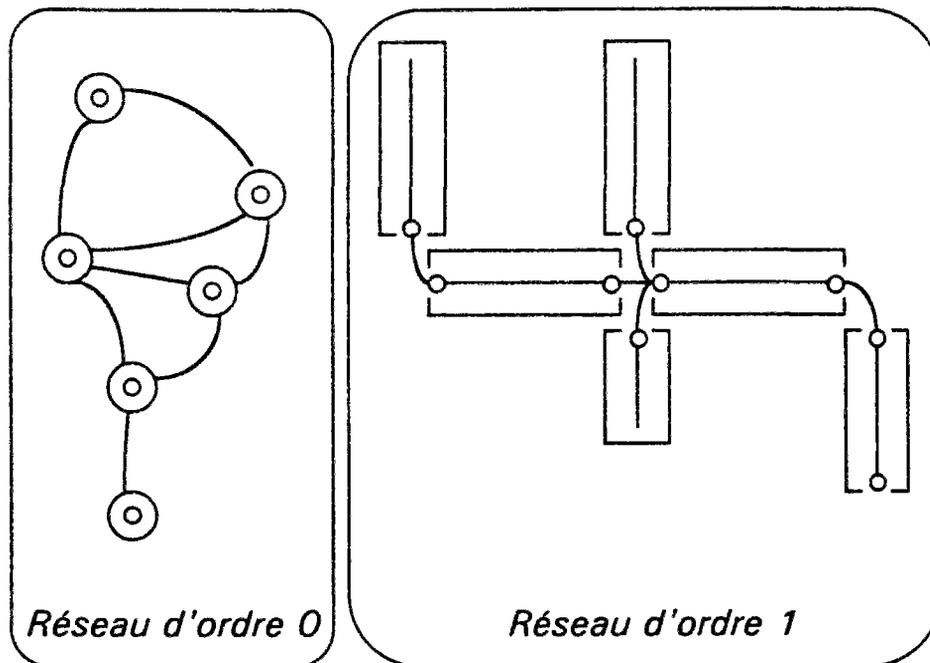


Fig. 50 - Types de réseaux utilisés pour la modélisation du site.

III. DEMARCHE POUR L'ELABORATION DU MODELE

Un modèle est tout d'abord une représentation cognitive des principaux phénomènes observés. Essayons donc de décrire les raisonnements à partir desquels a été construit le modèle présenté dans ce travail.

1. Observation des phénomènes

L'observation du phénomène à modéliser (le mouvement de personnes) ne faisant pas partie de ce travail, il a fallu tout d'abord recueillir, étudier, trier et évaluer les observations exposées dans d'autres travaux.

Lors de cette phase, il fut nécessaire d'apprécier, à l'aide de raisonnements d'ordre logique, scientifique, intuitif ou simplement de bon sens, la valeur comparée et la fiabilité de chaque apport potentiel existant dans la bibliographie, sans oublier de tenir compte de l'existence de biais éventuels (existence préalable d'un modèle à toute observation,...).

Pour notre part, nous avons retenu à travers l'étude de la littérature les faits marquants suivants:

- Le mouvement de foule évacuant un bâtiment est un phénomène subordonné à l'influence de nombreux paramètres, principalement:
 1. l'état initial et l'évolution de l'environnement (configuration du bâtiment, cause du mouvement, appréciation d'une gravité du danger, tenue du bâtiment, enfumage, blocages, systèmes automatiques d'extinction, de ventilation,...),
 2. des aspects physiologiques (mobilité, aptitudes face aux agressions),
 3. des aspects psychosociologiques importants (perception, identification de l'environnement, assistance,...).

- La maîtrise de ces problèmes soulevés par le mouvement de foule n'en demeure pas moins importante; un outil prédictif peut fournir une assistance significative dans ce sens.

- Une typification caricaturale des contextes d'une procédure d'évacuation pourrait conduire à distinguer les deux cas extrêmes (et théoriques) suivants:
 1. Un bâtiment fortement compartimenté à architecture linéaire, avec une population peu dense, disparate dans ses caractéristiques physiologiques et psychologiques, où les aspects comportementaux individuels sont dominants (nécessité d'une information individuelle sur le danger, recherche du chemin d'évacuation, stratégie hésitante). Dans cette catégorie, nous pourrions souvent classer les hôtels, les immeubles d'habitation, dans la plupart des cas les immeubles de bureaux, les établissements de soins à faible densité de population,...
 2. A l'autre extrémité, un bâtiment (ou plus généralement une configuration géométrique) de dimensions importantes, de géométrie complexe, densément peuplé, avec des vitesses de déplacement et des comportements qui ont tendance à s'uniformiser, et où le mouvement des personnes est dominé par des phénomènes de congestion et de variations spatio-temporelles importantes de la vitesse de déplacement. Les Etablissements Recevant du Public et particulièrement les centres commerciaux, salles de spectacles, grands magasins,... peuvent être considérés comme relevant de cette deuxième catégorie.

Au-delà de cette schématisation, il est évident que les facteurs d'ordre psychologique et plus généralement culturel ne peuvent en aucun cas être négligés dans le deuxième cas de figure présenté ci-dessus.

2. *Délimitation du champ d'étude*

Ce travail de thèse s'inscrit dans le contexte de ce deuxième cas de figure. Ce choix ne se justifie pas seulement par la nécessité d'appréhender le problème de l'évacuation là où les concentrations élevées augmentent sensiblement le risque de victimes multiples, mais également par les problèmes majeurs que soulève, selon notre avis, toute tentative de modélisation des attitudes comportementales de l'homme individuel évoluant dans un environnement d'incendie.

Modélisation du comportement humain

Le premier chapitre s'est efforcé de faire le point sur les tentatives audacieuses et intéressantes qui ont été entreprises ces dernières années dans le sens de la modélisation et de la simulation du comportement humain en situation d'incendie. Rappelons notamment:

- la représentation du comportement hésitant vis-à-vis du chemin d'évacuation à suivre, couplé aux probabilités d'arrêt et d'ouverture-fermeture des portes dans BFIREs;

- les règles de comportement des occupants en fonction de la situation d'enfumage dans EXITT;

- la "*sensibilité*" à la densité d'occupation, dans le module du même nom du logiciel AGORA;

enfin et surtout les deux modèles complets de comportement humain inspirés principalement des travaux de Lerup:

- la proposition de Filiz Ozel¹³⁸,

- et spécialement, le travail de Wassim Iskandarani¹³⁹.

Ces approches font souvent appel à des schémas très élaborés, d'un formalisme imposant, avec interactions et "feed-back" complexes. Nous pensons cependant qu'en l'état actuel des connaissances il est difficile d'élaborer un modèle véritablement opérationnel et fiable de comportement humain à l'aide des techniques et approches

¹³⁸ [OZEL 85]

¹³⁹ [ISKANDARANI 91]

mises en oeuvre jusqu'à aujourd'hui. A ce sujet il est important de souligner les points suivants:

1. Il est vrai que le comportement humain en situation d'incendie paraît, à première vue, abondamment documenté, grâce aux milliers d'observations réalisées jusqu'à nos jours. Cependant ces études se contentent de constater, expliquer, recenser, classer, et, tout au plus, trier dans l'ordre de leur enchaînement les actions des individus en situation d'incendie. Elles ne fournissent aucune information permettant de reproduire réellement dans l'espace et dans le temps le comportement humain; ni de corrélation des actions éventuelles avec certaines variables fondamentales que sont par exemple l'espace et le temps. Nous ne disposons donc pas de véritables probabilités conditionnelles de transition (au sens Markovien) d'un état à un autre. Pour schématiser, si nous savons avec quelle probabilité globale un comportement peut se manifester, nous ne savons pas affiner et préciser à *quel moment* et *où*, en fonction des conditions réelles, statiques et dynamiques.
2. Qui plus est, nous ne connaissons rien, ou presque, sur la "*convolution*" des attitudes comportementales, sur les interactions de groupe, ni sur les effets cumulés ou combinés de divers éléments susceptibles de conditionner le déclenchement d'une action. Par exemple, quel est l'effet combiné de l'épaisseur de la couche de fumée chaude, de la familiarité avec les lieux et du désir d'aller récupérer un objet précieux dans une pièce à une certaine distance du local en feu?
3. Les techniques de simulation mises en oeuvre sont beaucoup trop formelles et "rigoureuses" (simulations à pas de temps ou événementielles, avec des règles strictes "*si...alors*", même si celles-ci sont tempérées par des probabilités) pour décrire un processus aussi flou et chaotique que le comportement humain en situation de danger.

A notre avis, il est nécessaire de rester vigilant contre les tentations d'une modélisation, formellement élégante, mais souvent non pertinente, l'illusion de disposer d'un modèle valable, sinon valide, pouvant parfois se révéler plus dangereuse que l'absence totale de modèle. Bien sûr, ce risque existe à des degrés divers et accompagne toute tentative de modélisation. C'est pourquoi celle-ci ne saurait se concevoir sans être filtrée et recoupée à tous les stades de développement et de mise en oeuvre, par des raisonnements intuitifs, qualitatifs et des jugements d'expert.

Tous ces éléments nous amènent par conséquent à restreindre le champ des phénomènes que l'on cherche à modéliser aux aspects suffisamment cohérents et uniformes, pour pouvoir être traités avec un minimum de pertinence et sans le recours systématique à des choix arbitraires. Nous verrons cependant que les considérations comportementales ne peuvent être totalement évacuées.

3. Choix des données et informations nécessaires à la modélisation

La délimitation du champ de l'étude appelle un travail de sélection des données de base sur le mouvement de foule, parmi celles consultées dans la première phase, à partir desquelles sera élaboré le modèle.

De l'avis de la plupart des personnes ayant travaillé sur le sujet, l'étude des Soviétiques Predtechenskii et al constitue indubitablement la base de données expérimentale la plus fiable et plus complète sur le mouvement piéton à haute densité. Qui plus est, à partir de cette base, les auteurs proposent un modèle empirique décrivant avec une finesse particulière des phénomènes concomitants à la présence de foule, que tout un chacun a déjà qualitativement expérimenté dans sa vie. Rappelons également que les meilleures prédictions de temps d'évacuation ont été réalisées à l'aide de cette méthode de calcul (Kendik¹⁴⁰, AGORA¹⁴¹).

Cette phase d'intégration des données et de la description retenue du problème, aboutit à une première représentation mentale informelle des phénomènes. C'est cette représentation des phénomènes que le modélisateur doit tenter de transcrire à l'aide des outils de description et de modélisation adéquats.

4. Prémises d'un modèle

Les constatations sur les faiblesses des modèles existants, par rapport au but annoncé de ce travail, se résument avant tout par l'inadéquation des modes de représentation de l'environnement, qui imposent un découpage irréaliste dans le cas de configurations géométriques non conventionnelles.

¹⁴⁰[KENDIK 85], [KENDIK 86]

¹⁴¹[LARDEUX 92]

C'est également à ce niveau-là que se situe l'incompatibilité entre la représentation mentale, qui se forme par l'étude de la bibliographie, du mouvement de personnes dans un milieu architectural complexe et encombré, et l'approche retenue dans les modèles existants: la représentation d'un bâtiment à l'aide d'éléments de réseaux semble être une description insuffisante pour un site où les directions des déplacements des occupants ne sont pas connus a priori, et où ont lieu des phénomènes continus (dans l'espace) de variations de densité, de vitesse, etc..

L'idée fondamentale de ce travail de thèse est d'essayer de construire un modèle aussi proche que possible de la perception qualitative des phénomènes réels. Cette idée s'exprime à travers les questions suivantes:

- Comment "transcender" le problème de la description rectiligne de la géométrie, qui est à première vue indispensable pour permettre de traiter numériquement les problèmes, en ayant notamment recours aux données expérimentales disponibles?
- En définitive, comment élaborer un "réseau d'ordre 2" de l'espace vu en plan comme support à un modèle de mouvement de foule, et réussir ainsi à introduire l'indispensable 2ème dimension du mouvement plan?

Indiquons d'ores et déjà que le mode de représentation de l'environnement s'appuiera finalement sur un maillage 2D de l'espace. Ce maillage servira à la description des murs et autres obstacles physiques, le déplacement des occupants pourra quant à lui s'effectuer de manière continue dans tout l'espace laissé libre par la description des obstacles.

Il est aussitôt clair qu'une telle modélisation de la géométrie ne sera plus compatible avec une approche macroscopique, comme celle décrite par Predtechenskii pour le mouvement rectiligne à travers des "conduits d'évacuation": la suppression de la direction unique de mouvement rend impossible la détermination de groupes de personnes se déplaçant colinéairement à densité uniforme.

Ce travail se propose donc de mettre au point un modèle plus fin que celui de Predtechenskii et al, alors que, paradoxalement, les données expérimentales que fournissent ces auteurs sont déjà les plus fines. Cette thèse s'appuie en fait sur un pari:

"Il est possible d'étendre l'application des lois macroscopiques unidimensionnelles vitesse-densité mises en évidence par les chercheurs, au niveau

local de l'environnement proche de chaque individu, et de retrouver finalement une image macroscopique cohérente avec ces observations."

Il s'agirait donc plutôt d'une double démarche de déduction-induction:

- Si les phénomènes se manifestent d'une certaine manière au niveau macroscopique rectiligne, alors essayons *d'imaginer* ce qui peut se passer au niveau microscopique, de manière à reconstituer un comportement macroscopique cohérent, à la fois quantitativement par rapport aux lois macroscopiques, ainsi que qualitativement par rapport à l'acquis des observations, aux avis d'experts, ou encore à partir de jugements de bon sens.
- L'accomplissement de l'objectif précédent (s'il est atteint) permet d'étendre ("*d'induire*") la méthode de Predtechenskii et Milinskii au cas des configurations géométriques complexes, pour lesquelles le site ne peut être ramené à des éléments de circulations rectilignes.

Il est important de souligner la distinction méthodologique suivante, capitale afin de pouvoir porter un jugement sur la validité de ce travail:

- Le modèle proposé ne prétend en aucune façon simuler le comportement d'évacuation de chaque individu considéré séparément.

- Il s'efforce de reproduire des phénomènes macroscopiques de foule, via la juxtaposition et l'interaction de mouvements élémentaires d'individus dont la cohérence à titre individuel n'est pas exigée, ni même examinée. Pourquoi ne pas considérer qu'un comportement "moyen", est simulé, qui plus est dans un contexte où nous l'avons déjà vu et rappelé, les comportements présentent relativement peu de disparités?

IV. PRESENTATION DU MODELE

Nous nous sommes efforcé, dans ce qui suit, de présenter le modèle en faisant apparaître les diverses étapes de son élaboration, depuis la feuille blanche pour aboutir au modèle élaboré, à travers une succession d'enrichissements augmentant à chaque fois le degré de complexité du modèle. Au cours de cette démarche d'élaboration du modèle, nous serons amenés à clarifier ou spécifier les hypothèses de travail, tant pour les aspects cinématiques que pour ceux ayant trait au comportement humain.

Nous pouvons distinguer les étapes principales suivantes de développement du modèle, ces étapes correspondant à la fois à une succession chronologique, mais également à une complexification croissante:

- 1. Définition du modèle de représentation de l'environnement**
- 2. Identification des chemins d'évacuation**
- 3. Déplacement d'occupants en coordonnées continues**
- 4. Prise en compte de la vitesse variable**
- 5. Déplacement "micro-optimisé"**
- 6. Optimisation des arbres d'évacuation selon un critère de temps**
- 7. Respect de la densité**

C H A P I T R E 4 :

S U P P O R T G E O M E T R I Q U E A U N M O D E L E D ' E V A C U A T I O N D A N S U N E N V I R O N N E M E N T C O M P L E X E E T E N C O M B R E

Ce chapitre sera essentiellement consacré au mode de représentation de l'environnement architectural adopté dans le modèle présenté ici, ainsi qu'à certains des problèmes originaux découlant de ce choix. Sur le support géométrique défini, nous traitons en particulier du problème de l'identification des chemins d'évacuation avec prise en compte des obstacles et modélisation du contournement de ceux-ci.

I. REPRESENTATION DE L'ENVIRONNEMENT

Le développement d'un modèle d'évacuation adapté au cas des grandes salles nécessite une description aussi fine que possible de la géométrie, permettant notamment l'introduction des deux dimensions du mouvement plan des piétons.

Le mode de représentation de l'environnement adopté dans un modèle d'évacuation, constitue déjà un premier stade de modélisation du problème, qui conditionne toute la suite du développement du modèle. Pour nous affranchir des contraintes imposées par les approches de type réseau nodal que nous avons rencontrées, nous avons décidé d'avoir recours à une représentation plus fine de l'environnement, induisant le moindre degré de modélisation implicite possible.

Nous avons envisagé deux solutions générales, assez proches dans leurs principes:

1. Une représentation continue, qui n'est autre que la vue en plan de l'espace étudié, où les éléments entravant la circulation (murs et autres obstacles) sont représentés à l'aide de polygones. Cette représentation est la plus

"fondamentale" qui puisse exister, et n'introduit aucun biais, aucune simplification et aucune modélisation implicite dans la description de l'environnement.

2. Une représentation discrète, qui constituerait en fait une approximation de la représentation précédente à travers un maillage 2D à mailles carrées à l'instar de celui utilisé dans BFIRES (voir Chap.2 §III.2).

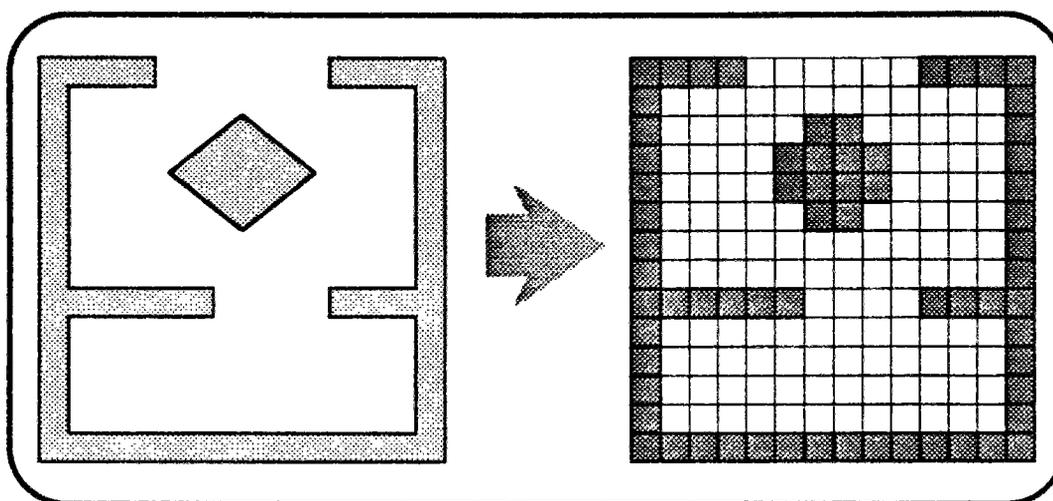


Fig. 51 - Représentation continue et représentation discrétisée par maillage carré de l'environnement.

C'est cette deuxième approche qui a été retenue à cause des problèmes de saisie et de traitement numérique qu'implique une représentation spatiale continue. Ces problèmes furent toutefois soupesés lors d'une piste initiale d'exploration qui, indépendamment de celle finalement privilégiée dans cette thèse, pourrait s'avérer prometteuse dans une voie future de développement du modèle.

Le mode de représentation de l'environnement dans cette proposition de modèle d'évacuation de foule depuis un milieu encombré est donc basé sur une discrétisation spatiale du plan du bâtiment, à mailles carrées et uniformes. La taille de la maille est choisie en fonction de la précision souhaitée dans la représentation du bâtiment et des obstacles. A chaque maille est attribué un descripteur de son état pouvant prendre 3 valeurs:

- case libre au mouvement des personnes (conventionnellement la valeur 0)
- case-sortie (conventionnellement la valeur 2)
- case-obstacle (conventionnellement la valeur 3)

La figure 52 illustre un exemple de salle modélisée selon ces principes.

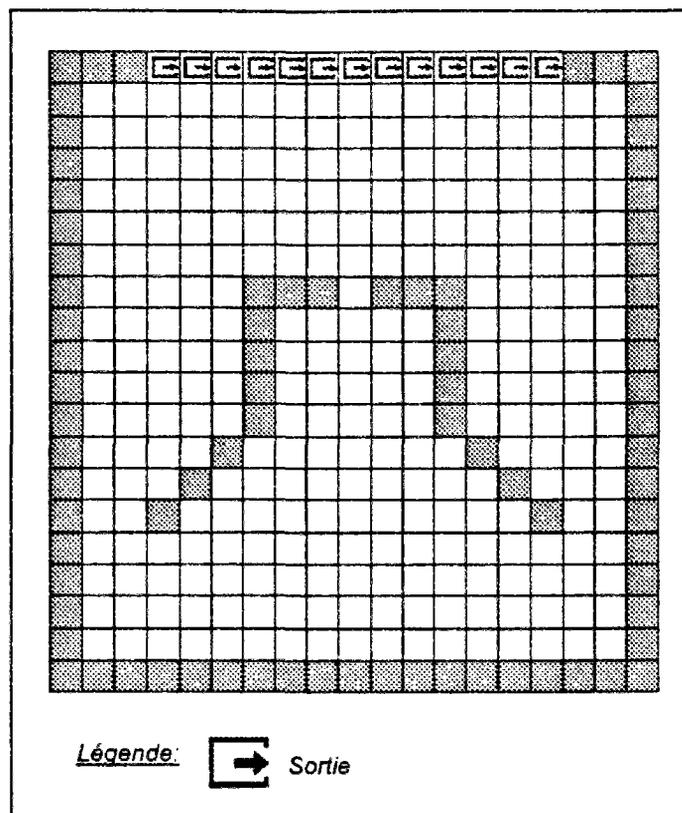


Fig. 52 - Exemple de représentation d'un site dans le modèle proposé. Image provenant du visualisateur graphique réalisé dans le cadre de ce travail - Voir Chap. 10.

II. IDENTIFICATION DES CHEMINS D'EVACUATION DANS UN ENVIRONNEMENT COMPLEXE

La phase suivant celle de description de l'environnement est nécessairement consacrée à la représentation des personnes et de leur déplacement. Mais, si l'on introduit un occupant dans l'environnement géométrique représenté de la manière que nous venons de décrire, quel sera son cheminement d'évacuation dans cette représentation complexe en deux dimensions?

Les grandes salles et sites architecturaux complexes présentent, par rapport aux immeubles fortement compartimentés, des particularités dont le modélisateur doit tenir compte. Dans les immeubles fortement compartimentés (hôtels, par exemple), les chemins d'évacuation sont aisément identifiables sur un plan, parfois uniques, et ne présentent en tout cas que peu d'alternatives. La taille réduite des locaux (chambre à coucher, par exemple) permet, d'autre part, de négliger le détail du mouvement des

occupants à l'intérieur de ces locaux, et de ne retenir qu'une distance moyenne ou un temps moyen permettant d'atteindre la sortie du local. De telles configurations rendent légitime le recours à une modélisation de l'environnement par réseau, qui ne peut au contraire être retenue pour l'étude du cas des grandes salles.

Le problème qui se pose alors est celui de l'identification d'itinéraires d'évacuation devant être empruntés par les occupants à l'intérieur d'une grande salle ou un environnement complexe, dans lequel sont disposés des obstacles entravant la circulation (cas des grands magasins, cinémas, hypermarchés). Les chemins possibles sont a priori extrêmement multiples, dans l'espace géométrique continu limité par les contours de la salle à évacuer, et la présence des obstacles compromet l'évidence de l'identification préalable des chemins optimaux. La figure 53 illustre ce problème: quel est le chemin que va suivre l'occupant A pour atteindre la sortie ?

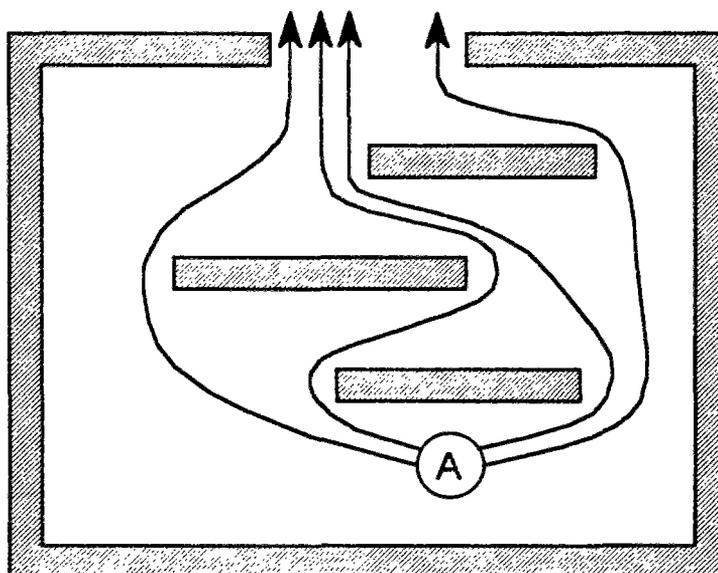


Fig. 53 - Cheminements possibles pour atteindre la sortie depuis le point A

Sur ce point, de sérieux problèmes de modélisation apparaissent, car plusieurs facteurs d'ordre "psycho-socio-culturel" entrent en considération: l'occupant modélisé connaît-il le chemin le plus court, ou est-il plutôt familiarisé avec un chemin particulier qu'il a l'habitude d'emprunter, ou bien encore, ignore-t-il tout des lieux et va-t-il entamer une démarche heuristique pour atteindre la sortie? Les chemins correspondant à ces trois types de comportement seront vraisemblablement différents.

Dans ce travail, nous avons choisi de ne représenter que le comportement "optimal" pour les raisons suivantes:

- Les aspects comportementaux d'hésitation liés à l'activité d'orientation spatiale ("*way-finding*") sortent du cadre de cette thèse. Qui plus est, il est fort improbable que ces attitudes jouent un rôle important dans le contexte étudié: en configuration de population dense, il semble légitime de penser que les individus ne connaissant pas le chemin vers la sortie vont simplement se mettre à suivre les occupants familiarisés avec les lieux.
- Le comportement de l'individu choisissant un itinéraire préféré, et non nécessairement optimal, semble plus intéressant et correspond, d'ailleurs, à une réalité fréquemment observée (cf. Chapitre 1). Le problème qui se pose encore une fois réside en la difficulté de la part du modélisateur d'introduire de manière "arbitraire" des cheminements censés représenter des itinéraires préférés d'occupants. En d'autres termes, les questions pratiques qui se posent sont les suivantes:
 - Comment éviter de désigner inconsciemment un trajet optimal?
 - De "combien" le trajet introduit doit-il diverger d'un trajet optimal?
 - Pour quels occupants faut-il décrire un itinéraire familier? Comment les choisir, en fonction de quels critères (proximité à une sortie, visibilité à partir de leur position initiale,...)
 - Quel pourcentage d'occupants suivra un itinéraire familier plutôt qu'optimal?

Ces considérations nous ont amené à ne pas modéliser ce genre de comportement dans la version actuelle du modèle: les occupants sont "idéaux" au sens où *ils connaissent à tout instant et depuis tout endroit de l'espace le chemin le plus court (en longueur) menant à la sortie la plus proche*. La modélisation du cheminement de l'occupant préférant un itinéraire familier est envisageable dans une évolution future du modèle: elle ne soulève aucune difficulté théorique, mais seulement des problèmes d'alimentation en données, comme nous l'avons déjà souligné, et nécessite également quelques aménagements de nature informatique.

Il est évident que la reconnaissance des chemins optimaux pour chaque évacuant ne peut être réalisée manuellement ou à vue d'oeil. Il a donc fallu satisfaire à ce besoin par l'incorporation dans le modèle d'évacuation d'un algorithme effectuant "sur mesure" la recherche du chemin optimal (chemin le plus court au sens de la longueur). Ce problème, assez éloigné des domaines de préoccupation classiques de la sécurité incendie, rejoint les travaux d'optimisation en recherche opérationnelle

(minimisation de trajectoires,...), ainsi que les travaux concernant les algorithmes cybernétiques pour robots.

Précisons que dans la version initiale du modèle, les individus occupent toujours le centre d'une maille. Comme dans BFIREs, l'occupant a la possibilité de se déplacer depuis chaque case au plus vers les 8 cases avoisinantes [Fig. 54], de manière similaire au déplacement du roi sur l'échiquier.

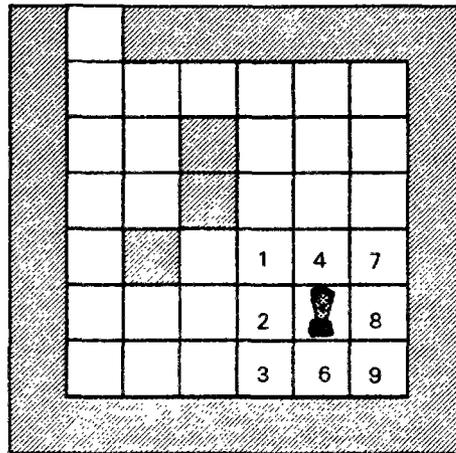


Fig. 54 - Places accessibles en un seul pas depuis la position initiale

II.1. Graphe associé au maillage

La recherche des chemins optimaux nécessite en premier lieu la transformation du plan discrétisé en réseau, afin d'être en mesure d'exploiter un des nombreux algorithmes développés en théorie des graphes. Nous établissons une bijection entre les cases du maillage et les noeuds du graphe que nous voulons construire. Les règles de mouvement nous suggèrent qu'à chaque noeud du graphe peuvent être reliés au maximum 8 arcs si l'on considère que le graphe est non orienté (arcs bidirectionnels), ou 16 si le graphe est orienté [Fig. 55].

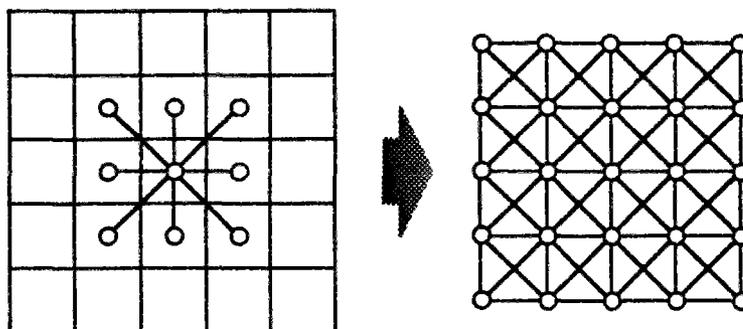


Fig. 55 - Principe de la conversion du maillage en graphe non orienté

La procédure de transformation doit être complétée par l'élimination des liens correspondant à des mouvements impossibles (notamment le passage en diagonale entre deux cases-obstacles). Cette opération devrait normalement s'achever par l'établissement d'une matrice booléenne des connexions. Cette matrice est carrée d'ordre n , où n le nombre de cases du maillage. Le graphe utilisé étant d'un genre particulier, il a paru utile de réduire la taille du tableau de $n \cdot n$ à $8 \cdot n$ en utilisant des

1	4	6
2		7
3	5	8

adresses relatives: chaque case ne peut être reliée qu'à 8 autres, auxquelles nous attribuons un indice de position par rapport à la première, variant de 1 à 8 comme sur la figure ci-contre. Nous profitons également de la procédure d'établissement de cette matrice de connexions (notée *Passes*) pour y stocker une information plus riche que celle de la simple valeur binaire indiquant l'existence d'un lien ou non:

Passes(i,j)=0: le lien existe et n'est pas diagonal (les 2 cases ont un côté commun).

Passes(i,j)=1: le lien existe et est diagonal (les cases n'ont qu'un sommet commun).

Passes(i,j)=2: pas de lien (les cases n'ont pas de sommet commun).

Algorithme de calcul du tableau *Passes*($n,8$):

Boucle sur toutes les cases $i=1, \dots, n$

```

{
  Si  $i = \text{mur}$  { tous les mouvements depuis  $i$  sont impossibles:  $\text{passes}(i,j)=2$ , pour  $j=1, \dots, 8$  }
  Sinon
  {
    Boucle sur toutes les cases voisines d'indice relatif  $j=1, \dots, 8$ 
    {
      Si: la case d'indice  $j$  existe (est à l'intérieur du maillage)
          et n'est pas un mur,
          et le lien ( $i,j$ ) n'est pas en diagonale entre 2 cases-mur
      alors:
      {
        ( $\text{passes}(i,j)=0$  si le mouvement est horizontal ou vertical
        ou  $\text{passes}(i,j)=1$  si le mouvement est en diagonale)
        (Si ce mouvement est possible, l'inverse l'est aussi.)
        et  $\text{passes}(\text{indice absolu de } j, \text{ indice relatif de } i) = \text{passes}(i,j)$ 142
      }
      Sinon {( $\text{passes}(i,j)=2$ )}
    }
  }
}

```

¹⁴² Cette opération permet d'accélérer sensiblement l'algorithme. Par contre, si le mouvement est impossible on ne peut écrire que le mouvement inverse l'est aussi, car celui-ci peut ne pas exister (case j hors-limites).

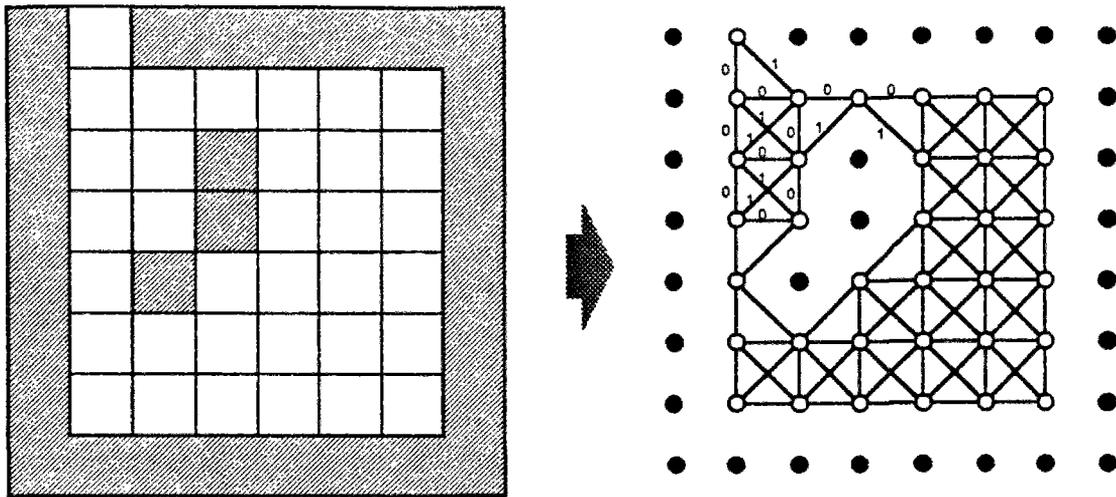


Fig. 56 - Exemple de conversion d'une configuration maillée en graphe associé. Les noeuds-obstacles sont définitivement éliminés.

Ainsi nous avons stocké dans une même matrice la connexité du graphe, et indirectement l'attribut de longueur des arcs. Soit en effet c la largeur de la maille du quadrillage, la longueur du lien (i,j) entre deux cases existantes i et j est donné par la formule:

$$l(i, j) = c \cdot \sqrt{k+1} \cdot \delta(k)$$

Avec:

k = passes (i , indice relatif de la case j par rapport à i)

$$\delta(k) \begin{cases} \delta(k) = 1, & \text{pour } k \neq 2 \\ \delta(k) \Rightarrow \gg & (\text{très grand nombre}), \text{ pour } k = 2 \end{cases}$$

où nous posons que la longueur du lien (i,j) est arbitrairement très grande si i et j ne sont pas des cases connexes.

Ces opérations favorisent la mise en équation du problème de la recherche des itinéraires minimaux (en distance) d'évacuation. Précisons, à l'occasion, qu'un chemin optimal sera nécessairement élémentaire (on ne passe pas deux fois par le même noeud). Notre intention initiale fut de développer un algorithme permettant l'identification de **tous** les chemins optimaux menant d'un point quelconque à une sortie, préalablement définie comme telle. Des efforts ont été fournis pour réduire la dimension du problème, mais, malgré quelques premiers résultats encourageants, il s'est vite avéré que, pour certaines configurations de géométrie, l'explosion

combinatoire était inéluctable. Ainsi dans l'exemple, volontairement complexe, de la figure suivante, le nombre de chemins optimaux n'est que de 14 pour l'occupant E (sortie 3), de 3 pour l'occupant G (sortie 3), et de 2 pour l'occupant I (sortie 5); par contre l'occupant placé en J a le choix entre 702 itinéraires de longueur égale et minimale le conduisant à la sortie la plus proche (sortie 3), la recherche des 702 solutions optimales de l'exemple ayant nécessité la comparaison entre 576064 chemins.

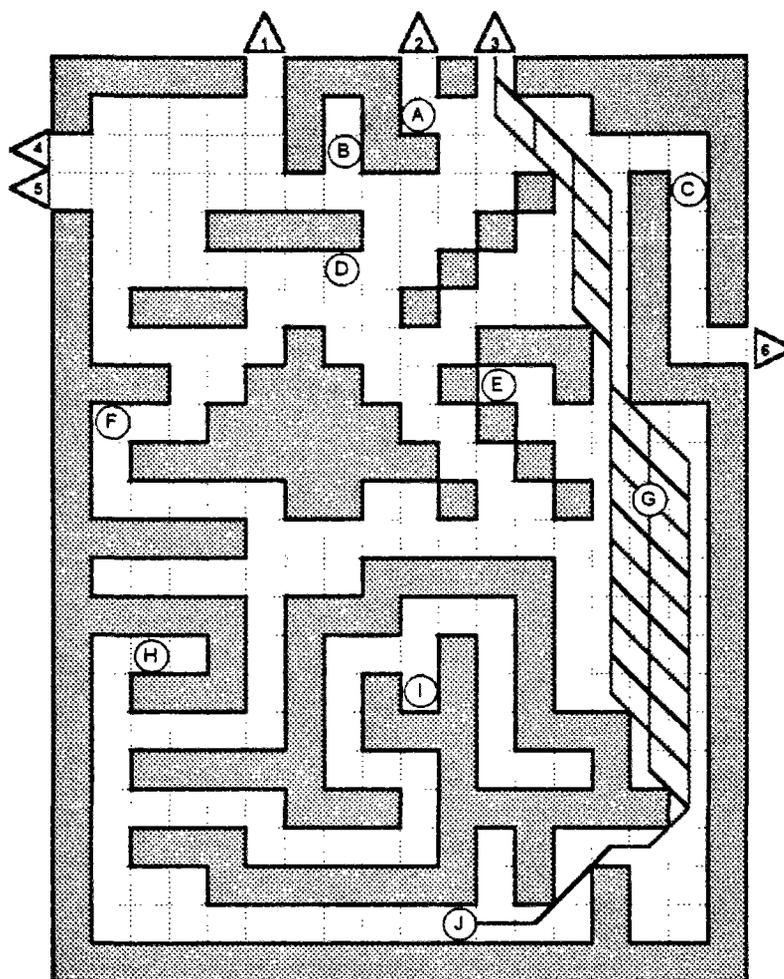


Fig. 57 - Exemple de calcul de tous les chemins optimaux pour l'occupant situé en J.

De tels problèmes risquent malheureusement d'être très fréquents à cause de la nature très particulière du graphe sur lequel est appliqué l'algorithme: la longueur des liens ne peut prendre que 2 valeurs: c et $c\sqrt{2}$ (rappel: c =largeur de la maille). Il est par conséquent logique de pouvoir retrouver de nombreuses suites de liens de longueur égale. Il est à signaler que les problèmes d'explosion combinatoire sont d'autant plus susceptibles de se manifester que l'environnement est simple et dégagé.

II.2. Algorithme de Dijkstra

Les problèmes de temps de calcul, mais également le fait que le nombre trop élevé de solutions rend difficile leur exploitation, nous ont fait renoncer à l'objectif maximaliste d'identification de toutes les solutions possibles, et nous ont orientés vers la recherche d'un algorithme ne permettant d'obtenir qu'un seul chemin optimal, parmi l'ensemble des solutions.

Dans le cadre de cette démarche, nous avons exploité l'algorithme de Dijkstra¹⁴³, qui présente l'avantage d'être relativement rapide, avec en contrepartie une plus grande difficulté de programmation, par rapport à d'autres solutions classiques (algorithmes de Ford, Dantzig). Cet algorithme est basé sur le principe de minimalité de Beliman, que nous énonçons brièvement comme suit:

"Soit C une suite de mailles représentant le chemin optimal entre la maille a et la maille b . Si, la maille k appartient à ce chemin ($C=(a,\dots,k,\dots,b)$), alors les sous-suites $C'=(a,\dots,k)$ et $C''=(k,\dots,b)$ de la suite C , représentent respectivement un chemin optimal de la maille a à la maille k , et de la maille k à la maille b ."

Ce principe est facilement démontrable par l'absurde.

Nous allons brièvement exposer l'algorithme de Dijkstra¹⁴⁴. Supposons que l'on recherche un chemin optimal menant de la case a à la case b . Soit n le nombre total de cases du maillage. A chaque itération, l'algorithme établit le chemin optimal depuis la case a vers une autre case du maillage, que l'on qualifie désormais "case résolue".

Définissons les grandeurs suivantes:

- $L(i)$, $i=1,n$: Distance depuis a jusqu'à i .
 E_1 : Ensemble des noeuds définitivement résolus
 E_2 : Ensemble des noeuds non résolus

Initialisations:

- $L(i)$ distance (a,i) , (∞ , s'il n'y a pas de lien (a,i)), $i=1,n$
 $L(a)=0$
 $E_1=\{a\}$
 $E_2=\{i=1,n; i\neq a\}$

¹⁴³ p. 1144 de [KREYSZIG 88]

¹⁴⁴ En Annexe 1 est proposé un exemple complet d'application de cet algorithme.

Boucle:

1. Choisir dans l'ensemble des noeuds non résolus, le noeud k pour lequel L est minimum:

$$L(k) = \min\{L(i), i \in E_2\}$$

Déplacer k depuis E_2 dans E_1 .

Si $E_2 = \emptyset$ ou $k = b$, alors FIN.

2. Pour tout $j \in E_2$, faire: $L(j) = \min\{L(j), L(k) + \text{distance}(j, k)\}$

L'algorithme tel que nous venons de le décrire se contente de calculer la distance optimale. Pour reconstituer le chemin optimal il faut également stocker la case-mère de chaque case. On modifie le pas 2:

2. Pour tout $j \in E_2$, faire: $d = \min\{L(j), L(k) + \text{distance}(j, k)\}$

Si $d < L(j)$: $L(j) = d$

$Mère(j) = k$

Cet algorithme construit de proche en proche un arbre d'évacuation. Si l'on cherche le chemin le plus court vers la sortie la plus proche (a priori inconnue), il faut inclure un test provoquant l'arrêt de la procédure quand toutes les cases-sorties sont résolues. Le chemin optimal est reconstruit dans le sens inverse (chaque case peut posséder plusieurs filles, mais une seule mère): on choisit la sortie présentant la valeur de distance la plus faible et, de manière récurrente, on obtient la case-mère de la sortie, puis la case-mère de celle-ci, ..., jusqu'à atteindre la case a .

Sur la figure 58 nous montrons les premières étapes de la construction de l'arbre d'évacuation de l'occupant B.

La figure 59 présente les chemins optimaux obtenus avec l'algorithme de Dijkstra pour l'occupant G du labyrinthe.

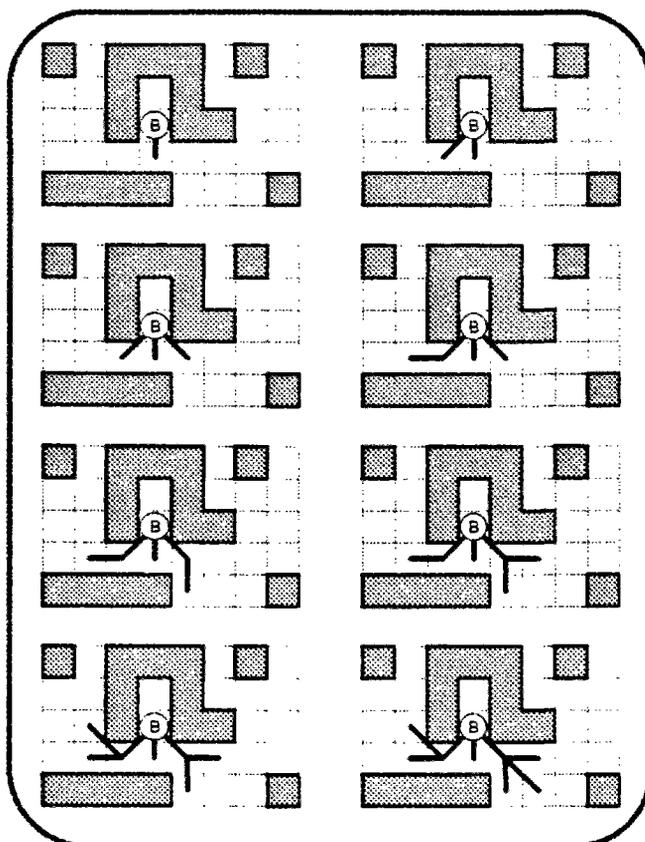


Fig. 58 - Premières étapes de la construction de l'arborescence optimale pour l'occupant B.

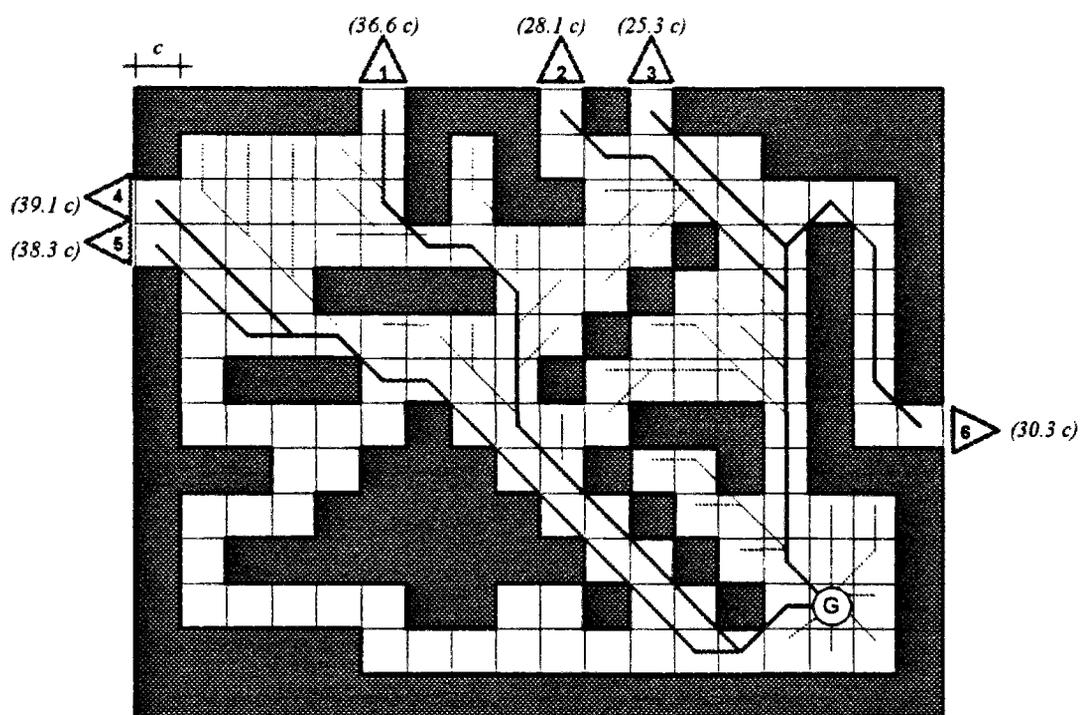


Fig. 59 - Chemins optimaux pour l'occupant G. Sont indiquées entre parenthèses les distances entre chaque sortie et l'occupant (c =largeur de la maille).

II.3. Introduction d'un second critère d'optimisation

Rappelons que l'algorithme de Dijkstra ne fournit qu'un seul chemin optimal, parmi les nombreux éventuellement existants. Or, nous avons vu que le genre de graphe que nous utilisons engendre une forte probabilité d'existence de nombreux chemins de longueur égale. Nous nous devons par conséquent de porter un jugement qualitatif sur le résultat produit. Un examen plus attentif du trajet d'évacuation identifié à l'aide de l'algorithme de Dijkstra pour l'occupant G et la sortie 5 met en évidence certaines anomalies de parcours, en l'occurrence il s'agit de brisures non justifiées de la ligne d'évacuation [Fig. 60].

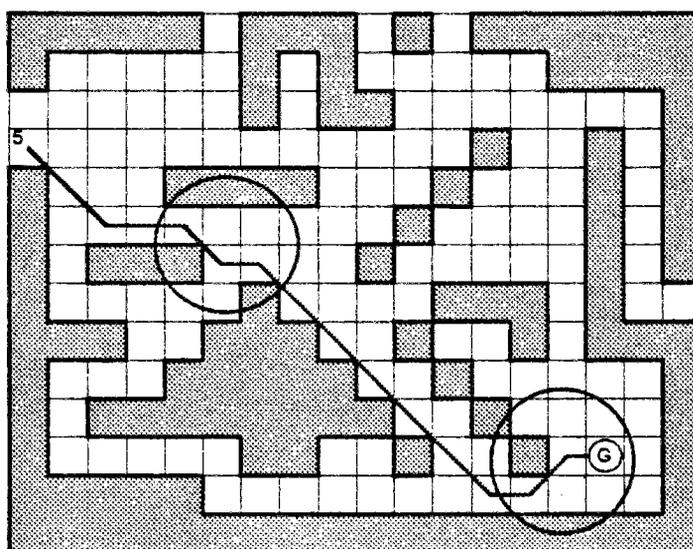


Fig. 60 - Chemin optimal obtenu à l'aide de l'algorithme de Dijkstra pour l'occupant G et la sortie 5. Les cercles indiquent des brisures "anormales" du chemin d'évacuation.

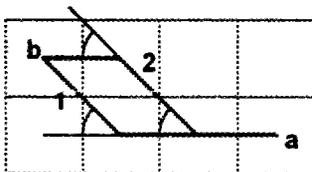
Ces trajets, examinés d'un simple point de vue de bon sens, ne paraissent pas logiques. Il semble légitime de penser que la variante indiquée en pointillés sur la figure précédente, comprenant moins de changements d'orientation, est plus susceptible de représenter l'itinéraire réel d'une personne se dirigeant vers la sortie. Or, la version standard de l'algorithme de Dijkstra ne permet bien sûr pas de prendre en compte de critères qualitatifs sur le chemin généré. Il a donc fallu modifier l'algorithme de manière à privilégier le choix des chemins les plus raides, parmi l'ensemble des solutions de longueur égale. Ceci a été obtenu avec l'introduction d'un critère secondaire d'optimisation, basé sur certaines règles de "comptabilité" en fonction des angles de rotation d'un occupant imaginaire suivant l'itinéraire d'évacuation.

Outre le tableau L contenant les distances de toutes les cases depuis la case d'origine, on introduit à présent le tableau T qui comptabilise les pénalités de virage accumulées depuis l'origine.

Barème de pénalisation des virages:¹⁴⁵

- |angle de rotation|=45°: pénalité=1
- |angle de rotation|=90°: pénalité=2

Ce barème ne peut bien sûr se justifier sur des raisonnements "scientifiques". Nous prétendons simplement que tourner une fois de 90°, est à peu près autant "à éviter"



que tourner 2 fois de 45°. Les deux chemins ci-contre, menant de a à b , ont la même longueur, mais le chemin noté 1 possède une pénalité de virage égale à 1, alors que $T(2)=2$.

L'algorithme de Dijkstra a donc été modifié de la manière suivante:

Initialisations:

$$L(i) = \text{distance}(a, i), (\infty, \text{ s'il n'y a pas de lien } (a, i)), i=1, n$$

$$L(a) = 0$$

$$T(i) = 0, i=1, n$$

$$E_1 = \{a\}$$

$$E_2 = \{i=1, n; i \neq a\}$$

Boucle:

1. Choisir dans E_2 le noeud pour lequel L est minimal:

$$L(k) = \min\{L(i), i \in E_2\}$$

Si plusieurs noeuds possèdent la même valeur de distance L , choisir parmi eux celui présentant le plus petit nombre de virages cumulés T .

Déplacer k depuis E_2 dans E_1 .

Si $E_2 = \emptyset$ ou $k=b$, alors FIN.

2. Pour tout $j \in E_2$, faire: $d = \min\{L(j), L(k) + \text{distance}(j, k)\}$
 $t = \min\{T(j), T(k) + \text{pénalité de } j \text{ à } k\}$

Si $\{(d < L(j)) \text{ ou } (d \approx L(j) \text{ et } t < T(j))\}$:

$$L(j) = d$$

$$T(j) = t$$

$$\text{Mère}(j) = k$$

¹⁴⁵ Il ne peut y avoir de virage de plus de 90° en un pas avec les règles de déplacement adoptées.

L'usage de cet algorithme permet de pallier les défauts de la version standard, et d'obtenir la variante du trajet d'évacuation indiquée en pointillés pour l'occupant G. Nous présentons sur la figure suivante les solutions finales de chemins optimaux obtenus à l'aide de l'algorithme de Dijkstra modifié pour les 10 occupants de la configuration du labyrinthe déjà présenté p.160.

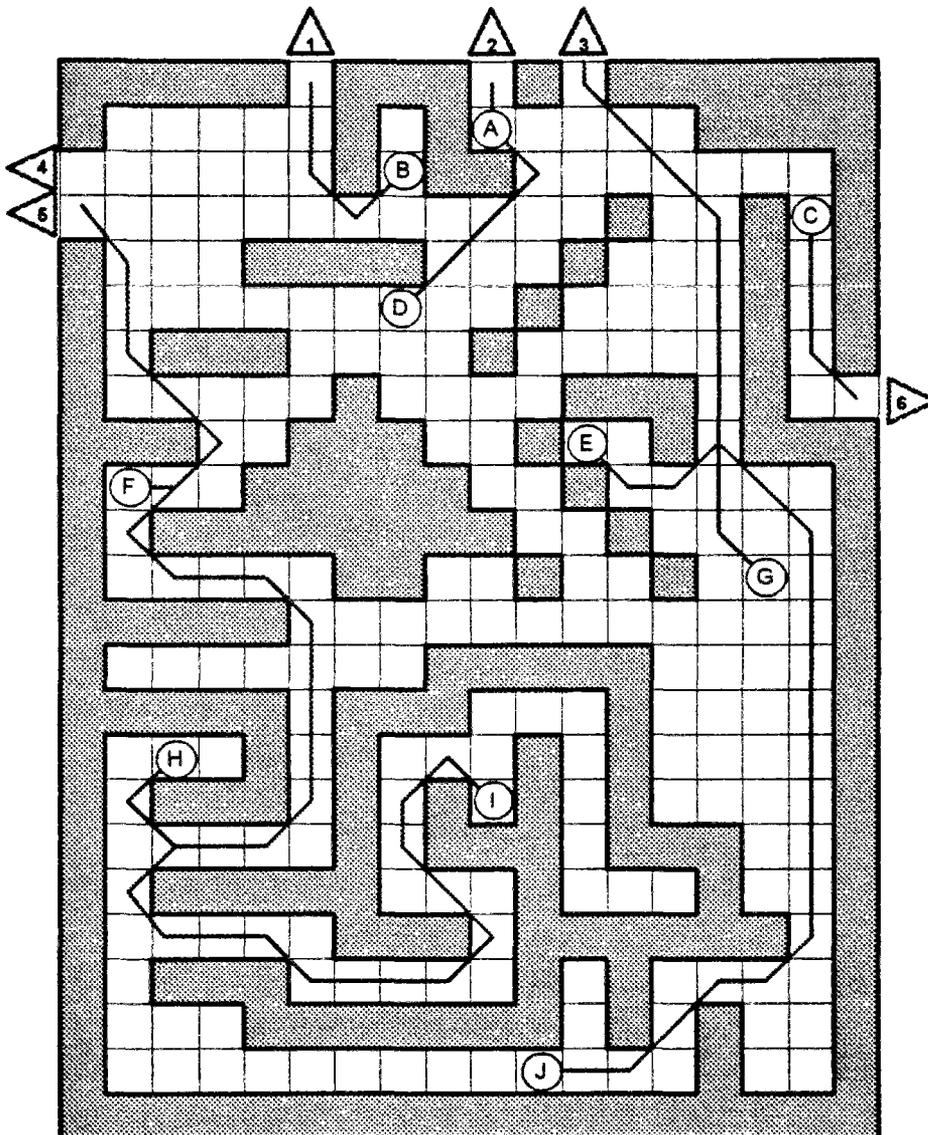


Fig. 61 - Chemins optimaux obtenus à l'aide de la version finale de l'algorithme de Dijkstra.

III. USAGE PRATIQUE DE L'ALGORITHME

III.1. Aspects algorithmiques

L'algorithme de Dijkstra est d'ordre n^2 . Le temps de résolution varie donc rapidement avec le nombre de mailles. Si on divise par deux la largeur de la maille, le nombre total de cases est multiplié par 4, et le temps de résolution sera approximativement 16 fois supérieur.

D'une manière générale, le temps de résolution peut poser de sérieux problèmes si l'algorithme est appliqué tel que nous l'avons décrit jusqu'à présent: il faut effectuer un calcul de chemin optimal autant de fois qu'il y a d'occupants, ou plus exactement de cases occupées. Or, il est possible d'avoir des centaines d'occupants sur des cases différentes. Il a par conséquent fallu trouver des solutions permettant d'accélérer la recherche des chemins optimaux.

Une première amélioration consiste à inverser le sens de la procédure de résolution: au lieu de démarrer de la position de chaque occupant pour se diriger vers les sorties, on démarre depuis chaque sortie pour atteindre tous les occupants. On obtient ainsi autant de plans d'évacuation qu'il y a de sorties. Parmi ces plans, il faut choisir, pour chaque occupant, celui offrant la distance minimale jusqu'à la sortie.

Remarquons que l'algorithme de Dijkstra construit une arborescence pour chaque sortie, la case-sortie constituant la racine de l'arborescence. Ceci signifie qu'il faut en principe appliquer l'algorithme autant de fois que de cases-sorties disponibles. Nous pouvons obtenir une amélioration très importante dans le fonctionnement de l'algorithme, en considérant que toutes les sorties possèdent un noeud-père fictif commun, qui constituera la racine d'une seule arborescence pour tout le graphe. On parvient ainsi à résoudre, en un seul passage, le problème de la recherche des chemins optimaux pour tous les emplacements du maillage. Qui plus est, nous n'obtenons qu'un seul chemin pour chaque emplacement, reliant celui-ci directement à la sortie la plus proche.

A titre indicatif, à l'aide de ces améliorations la recherche de tous les chemins optimaux sur l'exemple du labyrinthe nécessite environ 1 seconde sur une station de travail à processeur RISC, et 7 secondes sur ordinateur de type PC à processeur 386 avec coprocesseur mathématique.

Des gains supplémentaires en temps de calcul peuvent être obtenus en utilisant certaines "astuces":

1. Eliminer de la procédure d'identification toutes les cases-obstacles. Celles-ci seraient de toute façon résolues en dernier, étant donné que tous les arcs des noeuds-obstacles ont une longueur infinie. Diminuer de 25% le nombre de noeuds à résoudre divise presque par deux le temps de calcul.
2. Dans le même esprit, déclarer comme cases-obstacles toutes les mailles dont nous sommes sûrs qu'elle ne seront jamais utilisées pour le mouvement des personnes. Ceci trouve une application particulière dans le cas des sites dont le contour n'est pas rectangulaire. Etant donné que la modélisation de l'environnement s'appuie nécessairement sur la description du rectangle circonscrit, on peut être amené à introduire dans la représentation du site des zones de dimensions importantes correspondant à un espace inexistant ou n'ayant pas de sens sur le site modélisé. Par exemple, la représentation d'un simple couloir sous forme de "L" à l'aide de ce modèle oblige à décrire le rectangle circonscrit dans lequel toute la zone se trouvant en dehors du périmètre constitué par les parois du couloir et les sorties n'est pas accessible au mouvement piéton.
3. Arrêter la procédure quand toutes les cases occupées sont résolues. Ceci s'avérera particulièrement utile pour le développement du modèle à chemins optimisés sur le temps, pour lequel il sera nécessaire de faire appel à l'algorithme de Dijkstra à chaque pas de temps. Or, plus la simulation progresse, plus les occupants se trouvent près de la sortie et plus il est par conséquent possible d'interrompre de manière précoce l'algorithme.

III.2. Plans d'évacuation

La connaissance des chemins optimaux nous permettra dans une phase ultérieure de développement de mettre au point un modèle de déplacement des occupants.

Nous pouvons cependant dès à présent exploiter l'algorithme de Dijkstra modifié pour générer des plans d'évacuation de bâtiments. A cet effet, nous avons développé le visualisateur graphique *Tree*, sur PC et sur station de travail Unix, qui trace à l'écran les chemins optimaux calculés à l'aide de l'algorithme développé.

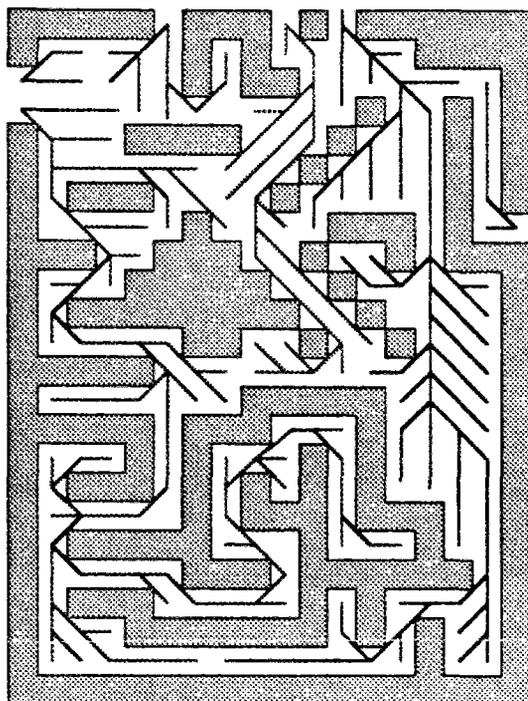


Fig. 62 - Plan d'évacuation du labyrinthe selon le chemin le plus court.¹⁴⁶

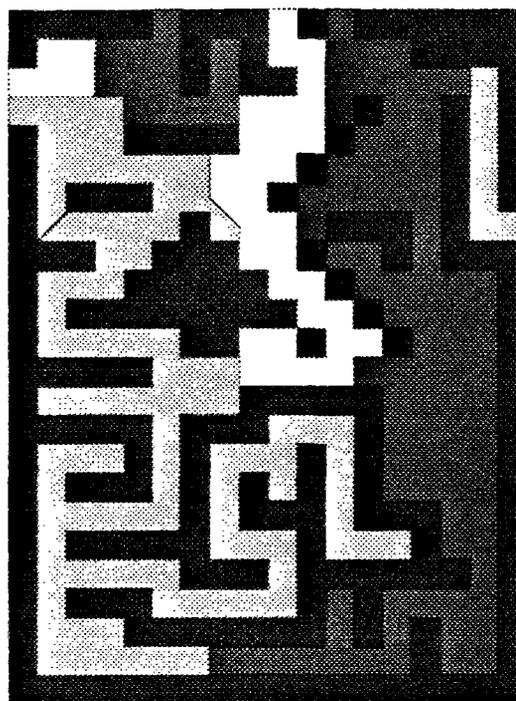


Fig. 63 - "Bassins de drainage" de chaque sortie correspondant à une logique de distance minimale.¹⁴⁷

Ces deux outils peuvent servir de base à quelques premières considérations rudimentaires sur l'évacuation du site étudié, notamment s'il est faiblement occupé, relatives aux aspects suivants:

- Guidage d'évacuation.
- Sinuosité des parcours.
- Longueur du chemin optimal le plus long (vers la sortie la plus éloignée).
- Longueur moyenne optimale d'évacuation.
- Aire du "bassin" de chaque issue, aire moyenne, aire maximale.
- Répartition des issues,...
- etc,...

¹⁴⁶ Cette figure n'est pas l'image directement obtenue à l'aide de l'utilitaire *Tree*. Cette dernière est en effet une image de type *bitmap* nécessitant à elle seule 200Ko pour être stockée dans ce document. Pour des raisons de taille des fichiers nous serons fréquemment amenés dans ce mémoire à utiliser des figures "vectorielles" (terme utilisé pour désigner les images pour lesquelles seules les coordonnées des éléments sont stockées) reconstituées à partir des images en provenance des visualisateurs graphiques qui ont été développés. Sur cet exemple l'image vectorielle ne nécessite que 20 Ko.

¹⁴⁷ Nous n'avons pas développé d'utilitaire pour ce type de vue, car nous nous serions heurté au problème classique de coloration des cartes (deux régions à frontière commune doivent avoir un motif différent).

C H A P I T R E 5 : D E P L A C E M E N T D E S O C C U P A N T S

I. PREMIERS ELEMENTS D'UN SIMULATEUR

Au chapitre précédent, nous avons défini les éléments de base de la modélisation de l'environnement. Nous avons également exposé la méthode retenue pour définir les itinéraires d'évacuation des occupants, à partir de l'hypothèse que ceux-ci connaissent suffisamment l'environnement pour suivre toujours le chemin le plus court menant à la sortie la plus proche. Le chemin optimal sera confondu au trajet des individus, dans la mesure où nous supposons que ceux-ci se déplacent en occupant toujours le centre d'une maille. Cette hypothèse est bien sûr tout à fait insuffisante pour un modèle aspirant à reproduire les phénomènes inhérents au mouvement de foule dense.

Nous allons par conséquent examiner au cours de ce chapitre la manière de déplacer un occupant selon des coordonnées continues. Ceci va nous permettre d'aboutir, dans une première phase, à un modèle d'évacuation simple, à vitesse constante. Il s'agit d'une étape préalable à l'introduction de la variation de la vitesse en fonction de la densité, qui constituera l'objet de la phase suivante de développement du modèle.

Le déplacement des occupants en coordonnées continues va permettre de dépasser les restrictions induites par la discrétisation de l'espace, celle-ci ne concernant plus que la description de l'environnement physique et non le mouvement même. En introduisant le mouvement, nous allons passer de la représentation statique du problème aux premiers éléments d'un simulateur.

Le type de problème que nous voulons modéliser concerne des phénomènes continus dans le temps qui se prêtent assez bien à une reproduction par simulation à pas de temps. Cette discrétisation temporelle répond également à la nécessité de

connaître, à divers instants, la position des occupants afin de pouvoir décrire les phénomènes de congestion.

D'autre part, rappelons que le type de modélisation que l'on se propose de développer nécessite un suivi individuel des occupants. La simulation consistera donc en une prédiction de la position de **chaque** occupant pour **chaque** pas de temps. Dans un premier temps nous allons donc voir comment prédire cette position en supposant que la vitesse de déplacement est constante.

II. DEPLACEMENT A VITESSE CONSTANTE

Une simulation à pas de temps peut s'appuyer sur une décomposition du mouvement des occupants en segments rectilignes. Se pose alors la question de définir la manière de déplacer l'occupant au cours d'un pas de temps.

Une solution consiste à suivre de manière stricte l'arborescence d'évacuation. Ceci n'est pas très intéressant, dans la mesure où le chemin "optimal" résulte d'une discrétisation spatiale de l'environnement, et qu'il est donc par définition plus long (ou égal) au chemin optimal d'une représentation géométrique continue. Dans l'exemple de la figure suivante, le chemin proposé à l'occupant qui serait initialement placé au coin inférieur droit de la salle présente un coude qu'il est improbable que l'occupant suive dans la réalité.

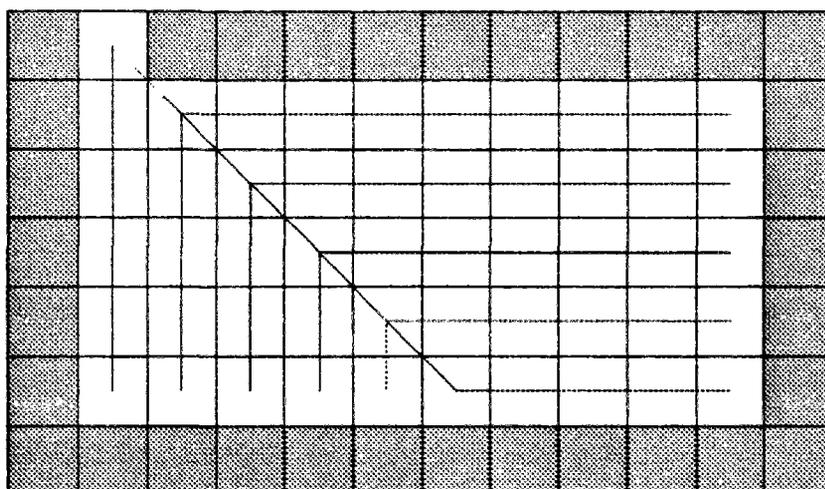


Fig. 64 - Chemin optimal obtenu à partir d'une représentation discrète de l'espace (image généré par Tree).

L'idée que nous avons suivie pour remédier à cet inconvénient est de diriger l'occupant vers le point le plus éloigné de l'arborescence d'évacuation qui demeure "visible" depuis sa position initiale. La visibilité doit s'entendre comme la non interruption par un obstacle du segment de droite reliant les deux points.

II.1. Détermination du but du déplacement

Nous introduisons un repère orthonormé fixe $(0,x,y)$.

Soit q la case correspondant à la position actuelle $A=(x_A,y_A)$ en coordonnées réelles de l'occupant sur le maillage. A partir de cette case, nous suivons l'arborescence d'évacuation telle que celle-ci a été établie au chapitre précédent, de case-mère en case-mère :

Initialisation:

$k=q$

Boucle:

1. Si k est une sortie: ARRET
2. Sinon: $k'=mère$ de (k)

Si le centre de k' visible depuis (x_A,y_A) , alors: $k=k'$, continuer → Pas 1
Sinon ARRET

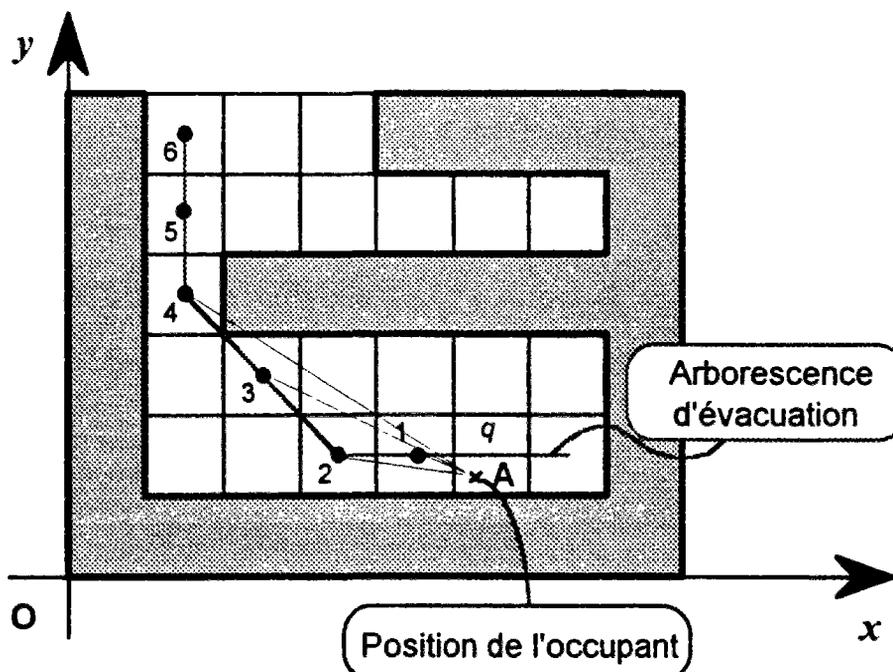


Fig. 65 - Procédure de détermination du but de déplacement de l'occupant situé en A.

Nous illustrons le fonctionnement de la procédure sur la figure précédente 65. De la position $A=(x_A, y_A)$ nous examinons successivement la visibilité des points 1 (toujours visible), 2, 3,... Nous voyons que le segment $(A,4)$ est coupé par un obstacle. Par conséquent le point 4 n'est pas visible et la procédure de recherche du but de déplacement est interrompue. La cible de l'occupant pour ce pas de temps est le point 3.

II.2. Détermination de la visibilité

Déterminer la visibilité entre deux points dans un espace continu constitue une opération assez délicate. Dans le contexte du type de représentation choisie, nous devons dès le départ discerner deux cas :

- Les cases auxquels appartiennent ces deux points sont voisines (possèdent au moins un sommet commun).
- Ces cases ne sont pas voisines.

Le test de visibilité est effectué entre la position réelle actuelle de l'occupant et le centre d'une case appartenant à l'arborescence d'évacuation. Il est indispensable de traiter séparément le premier cas, afin d'assurer qu'au moins la première case de l'arborescence est toujours visible à l'occupant, et éviter ainsi un blocage éventuel. Sur l'exemple de la figure suivante, il n'y a pas de visibilité directe entre le point A auquel se situe l'occupant et la première maille de l'arborescence d'évacuation¹⁴⁸.

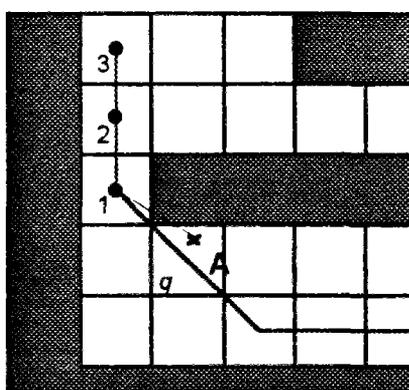


Fig. 66 - Exemple de cas pour lequel il n'existe pas de visibilité directe entre l'occupant et le centre de la première case de l'arborescence d'évacuation.

¹⁴⁸ Nous verrons au § II.2.2. la solution mise en oeuvre pour traiter le risque de blocage dans de telles circonstances.

11.2.1. Cases non voisines

Le cas des cases non voisines s'apparente aux problèmes classiques de visibilité rencontrés notamment en CAO. Nous avons choisi de le traiter d'une manière simple et fiable, et qui n'est peut être pas la meilleure possible. Nous pensons qu'il doit exister des algorithmes et des techniques plus performants, mais, n'étant pas spécialiste du sujet, nous nous sommes contentés de la méthode suivante [Fig. 67]:

1. Soient A et B les points pour lesquels nous voulons déterminer si l'un est "visible" depuis l'autre. Définissons le plus petit rectangle de cases ayant comme diagonale ce segment de droite [AB]. Sur le schéma suivant, ce rectangle est élargi sur son périmètre d'une case pour des raisons que nous exposons plus loin.
2. Pour chaque case-obstacle appartenant à ce rectangle nous recherchons une éventuelle intersection de chacun des 4 côtés de la maille avec le segment [AB]. Supposons que l'on cherche à déterminer l'intersection éventuelle entre le segment déterminé par les points A et B, de coordonnées respectives (x_A, y_A) et (x_B, y_B) , et un côté vertical d'une case-obstacle défini par les coordonnées (x, y_1) et (x, y_2) . Le test d'interception du segment par le coté de la maille est le suivant:

$$\begin{aligned}
 & \text{Si } (x_A - x) \bullet (x_B - x) < 0 \quad (\Leftrightarrow \quad x \text{ entre } x_A \text{ et } x_B) \\
 & \{ \\
 & \quad y_{\text{inter}} = y_A + (x - x_A) \bullet (y_A - y_B) / (x_A - x_B) \\
 & \quad \text{Si } (y_{\text{inter}} - y_1) \bullet (y_{\text{inter}} - y_2) < 0 \quad \Rightarrow \text{INTERCEPTION: POINTS NON VISIBLE-ARRET} \\
 & \}
 \end{aligned}$$

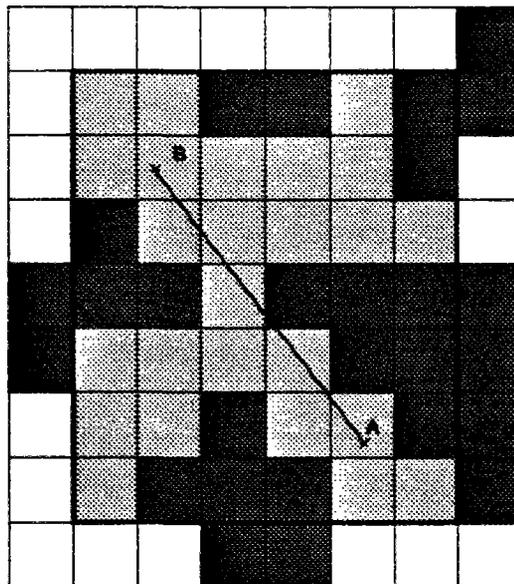


Fig. 67 - Rectangle retenu pour la recherche d'éventuelles intersections du segment [AB] avec les obstacles.

3. Dès qu'une intersection est rencontrée, la procédure est interrompue et les deux points sont considérés comme non visibles l'un depuis l'autre.

A ce stade de développement du modèle, les occupants sont considérés comme ponctuels puisque nous n'avons émis aucune considération sur les problèmes de densité. Il ne faut cependant pas perdre de vue que les coordonnées d'occupants que nous manipulons ne représentent que le centre de la position de l'occupant, et que par conséquent ce "centre" ne peut se trouver en contact direct avec les parois. Nous avons choisi d'interdire au mouvement une zone de largeur constante, en l'occurrence de 15 cm, autour de toutes les parois: le "centre" d'un occupant ne peut se trouver dans cette zone [Fig. 68]. Nous tenons compte de cette zone d'exclusion lors du test de visibilité: nous considérons qu'une cible est visible si l'occupant peut se diriger en ligne droite vers celle-ci sans se trouver plus près de 15 cm d'un mur ou d'une arête quelconque d'une case-obstacle. Ceci explique pourquoi le rectangle retenu dans le schéma précédent est élargi d'une case selon ses 4 côtés par rapport au rectangle ayant comme diagonale le segment [AB].

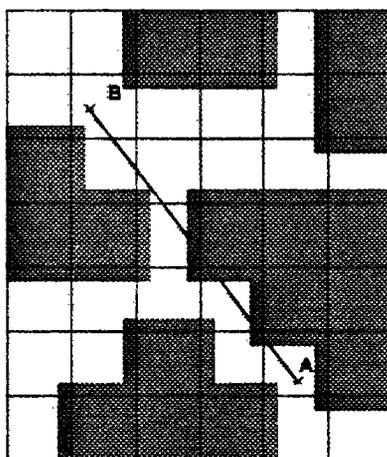


Fig. 68 - Introduction d'une zone interdite, de largeur constante, autour des obstacles.

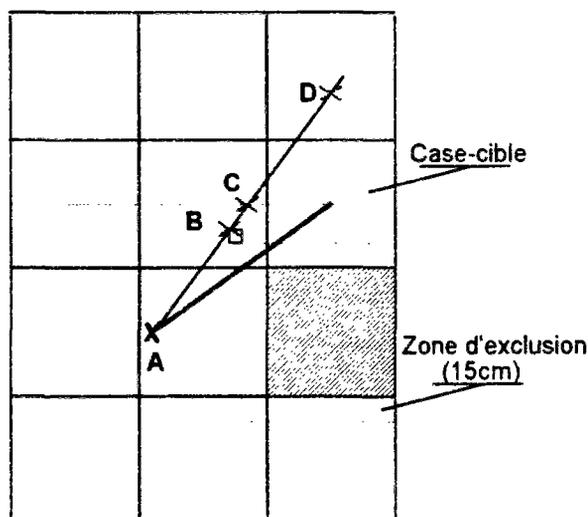
Nous signalons que dans l'utilisation pratique du simulateur, la détermination du but de déplacement, avec les tests de visibilité que celle-ci nécessite, est très rapide et ne pose pas de problème de temps de calcul.

11.2.2. Cases voisines

Le passage d'une case vers la case voisine nécessite un traitement particulier à cause de la probabilité que l'arête d'un obstacle occulte la vue du centre de la case-cible.

Dans ce cas, nous introduisons une déviation du mouvement en définissant une nouvelle cible selon le principe suivant [Fig. 69]:

- Nous traçons la droite reliant la position de l'occupant (point A) et le point décalé de l'arête gênante de 18 cm (15cm+3cm pour éviter les tests numériques délicats) selon x et y (point B).
- Nous définissons les points C et D comme l'intersection de cette droite et de l'horizontale et verticale, respectivement, passant par le centre de la maille-cible. Ces points ne sont définis qu'à condition de ne pas se trouver dans une case-obstacle (± 15 cm).
- Est choisi comme but dévié du mouvement le point parmi B, C et D le plus proche du centre de la case-cible (sur l'exemple du schéma, le point C).



II.3. Déplacement de l'occupant

Le but de l'individu ayant été défini, il ne reste plus qu'à déplacer l'occupant vers ce but. Soit Δt le pas de temps et v la vitesse de déplacement, constante puisque nous supposons encore que celle-ci ne dépend pas de la densité. La longueur maximale du pas de déplacement de l'occupant au cours d'un pas de temps est $\Delta t \cdot v$. Il convient cependant de borner ce pas de manière à ne pas dépasser la cible:

$$\text{Longueur du pas} = \min\{ \Delta t \cdot v, \text{distance au but} \}$$

III. DISCUSSION

IV.1. Exemples

Nous venons de décrire le mode de fonctionnement d'un simple simulateur microscopique de mouvement de personnes isolées, en environnement géométrique complexe, représenté à l'aide d'un maillage de la vue en plan du site.

Le mode de définition du but à chaque pas de temps apporte une amélioration significative du fonctionnement du modèle, en corrigeant en partie les effets induits par la discrétisation spatiale.

Nous voyons sur la figure suivante que le mouvement de l'occupant se fait strictement suivant une ligne droite, alors que l'arbre d'évacuation sous-jacent présente un coude important (voir début du chapitre). L'image de cette figure provient du post-processeur de visualisation des résultats de simulation. La simulation a été effectuée avec une hypothèse de largeur de la maille d'un mètre et une vitesse de déplacement de 0,95m/s.

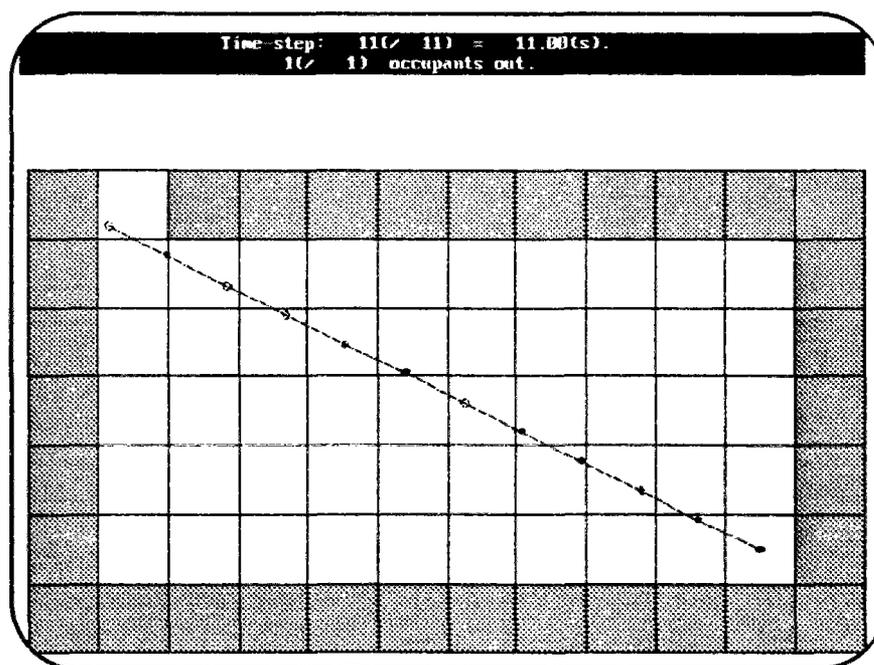


Fig. 69 - Déplacement finalement obtenu pour l'occupant initialement situé au coin inférieur droit.

Voici un extrait du fichier de résultats:

RESULTATS DE SIMULATION	
Nom de Fichier :	truc.d
Largeur de la maille:	1.00
Temps total d'évacuation:	11.00 secondes
Nombre de pas de temps:	11
Durée du pas de temps:	1.00 secondes

Occupant No.	Position Initiale		Temps d'Evacuation (sec.)	Pas de temps	Distance "Initiale" (m)	Distance parcourue (m)	Case Finale		Sortie No.
	x	y					x	y	
1	11	2	11.	11	11.07	10.45	2	7	1

Nous remarquons que l'occupant n'a parcouru que 10,45m au lieu de 11,07m qui correspondent à la ligne brisée du chemin "optimal" discrétisé (au sens qu'il passe toujours par le centre des mailles).

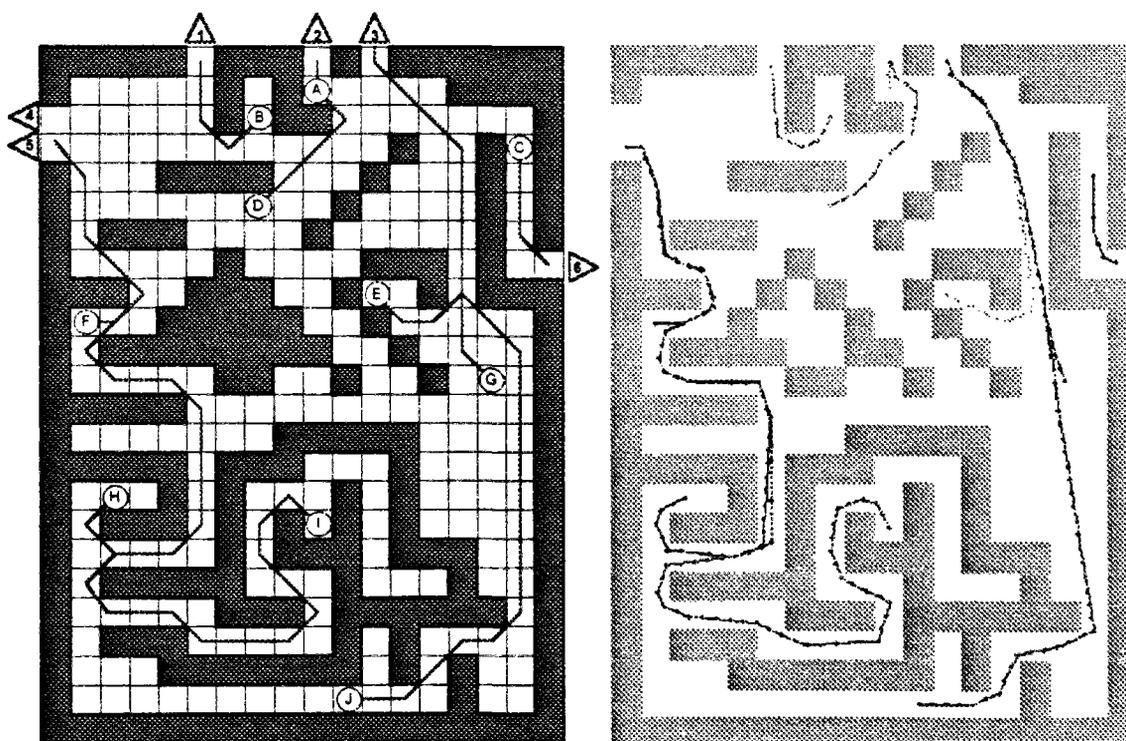


Fig. 70 - A gauche: chemins optimaux d'évacuation. A droite: trajets obtenus par simulation (pas de temps=0,5s, largeur de maille=1m, temps total d'évacuation=42,5s).

Sur les figures ci-dessus nous comparons, dans le cas du labyrinthe, les itinéraires optimaux calculés au chapitre précédent, et les cheminements des occupants obtenus à l'aide de la première version du simulateur présentée dans ce chapitre. Nous remarquons que les trajets des occupants sont plus lisses que les chemins "optimaux". Ceci est l'effet de deux phénomènes agissant simultanément:

- Comme nous l'avons déjà montré, le choix du but le plus éloigné atténue les brisures de la ligne d'évacuation dues à la discrétisation de l'espace.
- Outre les brisures dues à la discrétisation de l'espace, il y a aussi celles qui correspondent à un contournement d'obstacle, et qui sont très nombreuses dans le cas de l'exemple du labyrinthe. Celles-ci ne peuvent être évitées par l'occupant. Or la déviation que nous avons introduit chaque fois que l'occupant ne voit pas directement le centre de sa case-cible, phénomène qui se manifeste de manière systématique à chaque virage de contournement d'obstacle, induit lui aussi un lissage de la trajectoire en empêchant le virage brutal de l'évacuant.

Ces deux "lissages" sont de nature totalement différente:

- Le premier phénomène a tendance à raccourcir le trajet de l'occupant. C'est par exemple le cas de l'occupant J qui effectue peu de virages sur son parcours, et traverse des zones relativement peu encombrées d'obstacles. Son parcours est de 27,5m alors que le chemin optimal est de 28,3m.
- Le second allonge le parcours de l'occupant. L'occupant I, qui suit le chemin le plus sinueux, parcourt au total 40m au lieu de 38,6m correspondant au trajet optimal.

IV.2. Sensibilité au pas de temps

Il est facile d'imaginer que ce second phénomène est sensible au pas de temps: un pas de temps très court aura tendance à atténuer l'ampleur des déviations en autorisant l'occupant à effectuer des virages plus brutaux. Les deux figures suivantes proviennent de résultats de simulation avec un pas de temps de 0,2s et 1s respectivement, et sont à comparer avec l'image précédente correspondant à un pas de temps de 0,5s.

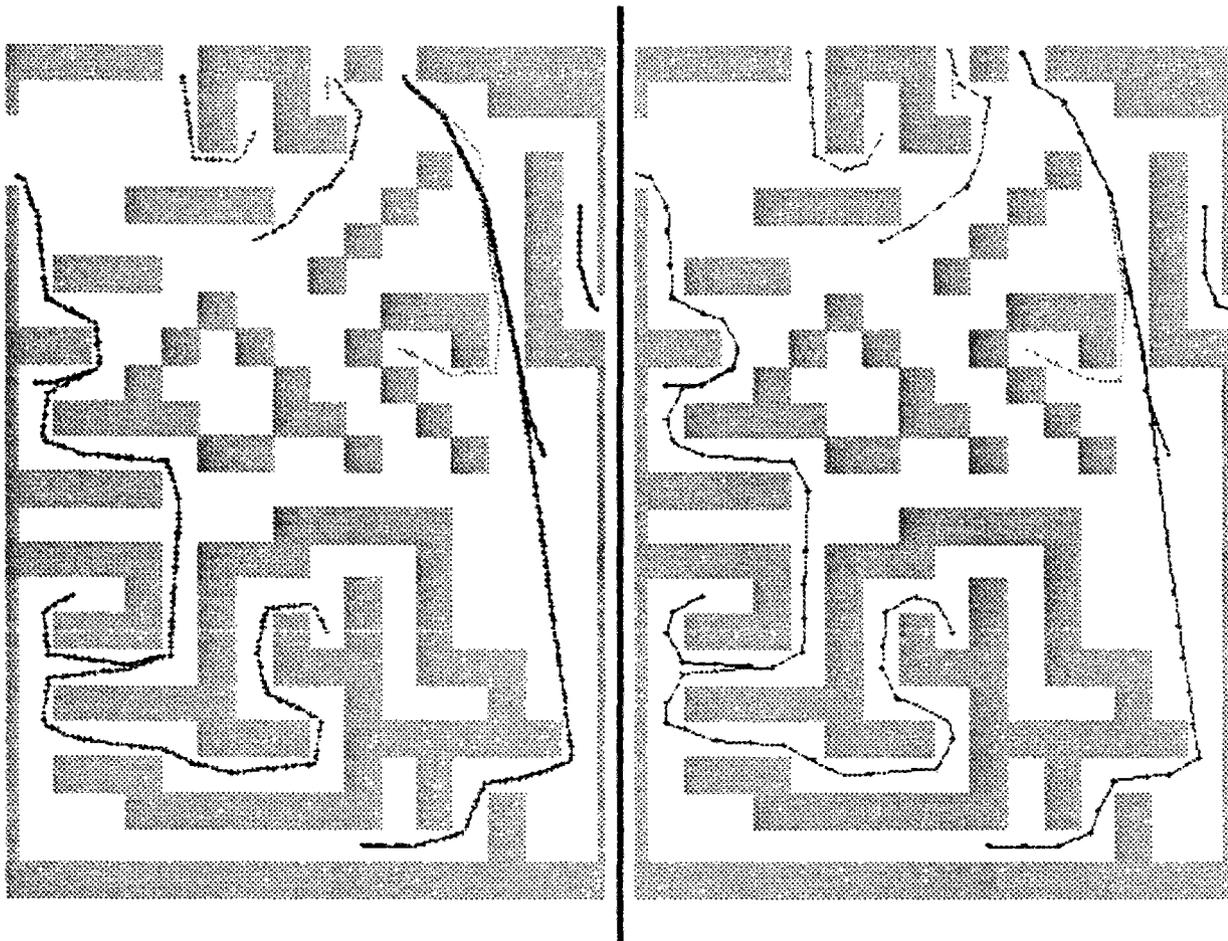


Fig. 71 - Evacuation du labyrinthe avec deux pas de temps différents. A gauche: pas de temps=0,2s, temps d'évacuation=38s. A droite: pas de temps=1s, temps d'évacuation=48s.

Les temps d'évacuation (qui correspondent au temps de déplacement de l'occupant le plus éloigné I), sont donnés dans le tableau suivant.

<i>Pas de temps</i>	<i>Temps d'évacuation</i>	<i>Longueur parcourue par l'occupant I (*)</i>	<i>Vitesse moyenne de l'occupant I</i>
0.2s	40s	38m	0.95 m/s
0.5s	42.5s	40m	0.94 m/s
1s	48s	40.6m	0.85 m/s

(*) La longueur du chemin optimal est 38,6m.

Une remarque importante doit être émise pour le cas de la simulation avec un pas de temps de 1 seconde. L'examen des deux dernières colonnes du tableau nous indique que l'allongement du temps d'évacuation avec un pas de temps de 1s n'est pas

tellement dû à un allongement du trajet (seulement +0,6m par rapport à la simulation avec un pas de temps de 0,5s), mais au tronquage du pas de déplacement de l'occupant ($\Delta t \cdot v$), celui-ci étant trop grand pour pouvoir être réalisé au cours d'un seul pas de temps. Ainsi, la vitesse moyenne chute à 0,85 m/s au lieu de la vitesse de 0,95 m/s que nous avons introduite. Par conséquent il faudra faire preuve de prudence et ne pas utiliser un pas de temps trop important par rapport à la finesse du maillage et la sinuosité des chemins d'évacuation. Une règle que l'on peut logiquement suivre si la configuration est susceptible d'engendrer des parcours très sinueux est la suivante:

$$\Delta t \cdot v \leq c/2 \quad (c = \text{largeur de la maille})$$

Nous remarquons par contre que les simulations à pas de temps de 0,2s et 0,5s se déroulent quasiment à la même vitesse. Cette fois-ci la différence est due à la manière de "négocier" les virages: avec un pas de temps de 0,2s les virages sont beaucoup plus abrupts. Se pose donc la question de savoir lequel est le bon? Sur ce point, il est difficile d'émettre des jugements autres que qualitatifs. Pour notre part, nous considérons que les virages sont trop raides pour correspondre à un mouvement réel d'occupant. Nous avons déjà émis l'hypothèse, discutable dans le cas de configurations comme celle du labyrinthe, que les occupants connaissent et suivent le chemin le plus court; il ne semble pas pertinent de supposer qu'il le feront de la manière la plus parfaite qu'il soit, en suivant le chemin au plus près de la corde.

En tout état de cause, le pas de temps sera un facteur important, le choix duquel devra être soupesé en fonction de la configuration du site modélisé: finesse du maillage, sinuosité des itinéraires,...

C H A P I T R E 6 : D E P L A C E M E N T A V I T E S S E V A R I A B L E

Au chapitre précédent nous avons élaboré les premiers éléments du simulateur de mouvement de personnes que l'on souhaite mettre au point: représentation des occupants en coordonnées continues, choix de la cible du déplacement,... Les exemples de simulation que nous avons exposés jusqu'à présent ne concernent que des configurations où la densité d'occupation est très faible. Le modèle présenté ne sera plus valable si les lieux viennent à être densément occupés. Dans ce chapitre, nous développons les premiers éléments d'un véritable modèle d'évacuation dédié au cas du mouvement de foule à haute densité.

I. MODE DE PRISE EN COMPTE DE LA DENSITE

A ce niveau, nous allons introduire dans le modèle l'hypothèse de base de ce travail, dont nous avons déjà fait état au chapitre 3:

Il est possible d'étendre l'application des lois macroscopiques unidimensionnelles vitesse-densité au niveau local de l'environnement proche de chaque individu, et de reconstruire ainsi une image macroscopique cohérente et pertinente du mouvement de foule.

Rappelons que cette hypothèse est strictement fausse puisque les résultats d'observation dont nous souhaitons faire usage ne concernent que des occupants se déplaçant linéairement en paquets à densité uniforme.

Nous avons exprimé cette hypothèse en introduisant une grandeur de "densité locale" de la manière suivante:

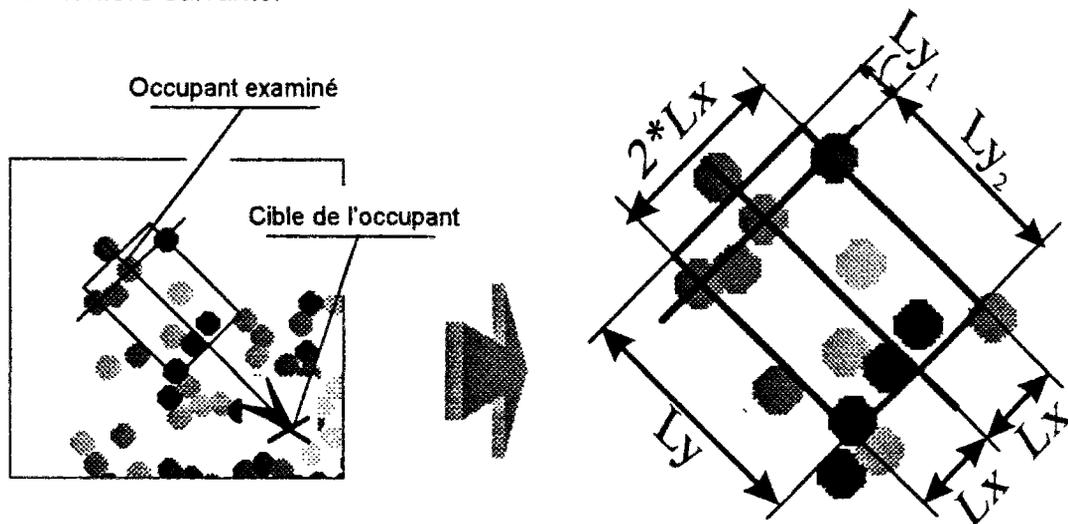


Fig. 72 - Définition du rectangle d'influence de l'occupant

- Nous définissons un "rectangle d'interactions" ou "rectangle d'influence" autour de chaque occupant. L'axe longitudinal de ce rectangle se confond avec la droite reliant l'occupant et sa cible. Après de nombreux essais de calibrage, les dimensions du rectangle que nous avons choisi de retenir sont les suivantes:

$$Lx = 0.75m$$

$$Ly = 2m \begin{cases} Ly_1 = 0.3m \\ Ly_2 = 1.7m \end{cases}$$

- Ce rectangle est censé représenter les limites de la zone susceptible d'influencer de manière instantanée la vitesse de l'occupant.
- La vitesse de déplacement est calculée selon une loi vitesse-densité à partir de la densité locale dans le rectangle d'influence de l'occupant. En l'occurrence nous utilisons les lois proposées par les auteurs soviétiques.
- Ceci suppose le calcul de 2 termes:
 1. le nombre d'occupants dans la zone d'influence.
 2. la surface nette ou "libre" du rectangle (après déduction des obstacles).

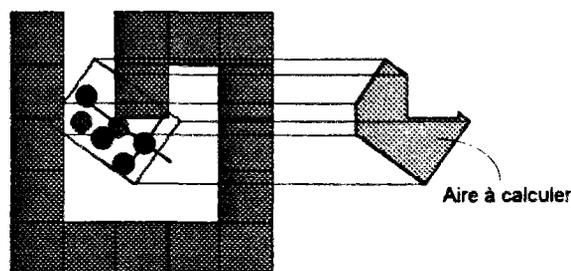


Fig. 73 - Aire nette influençant le calcul de la densité.

- Le calcul de l'aire nette est assez délicat. C'est cette difficulté qui nous a d'ailleurs incité à opter pour une définition de la zone d'influence sous la forme d'un rectangle, plutôt que d'une ellipse, d'un triangle, etc...

II. ASPECTS NUMERIQUES DU CALCUL DE LA DENSITE

II.1. Calcul du nombre d'occupants dans le rectangle de référence

Signalons tout d'abord que le calcul des densités est effectué au début de chaque pas de temps, à partir des positions des occupants obtenues à la fin du pas de temps précédent.

La détermination du nombre d'individus présents dans le rectangle d'influence d'un occupant donné nécessite un test d'inclusion dans ce rectangle des autres individus présents -théoriquement de tous les autres individus, mais en pratique des individus se situant à proximité suffisante pour que ce test soit susceptible de s'avérer positif.

- A chaque occupant pour lequel nous cherchons à établir la densité locale nous faisons correspondre un nouveau repère local dont l'origine est la position de l'occupant. L'axe des ordonnées est confondu avec la droite reliant l'occupant et sa cible, et est orienté dans le sens occupant→cible.

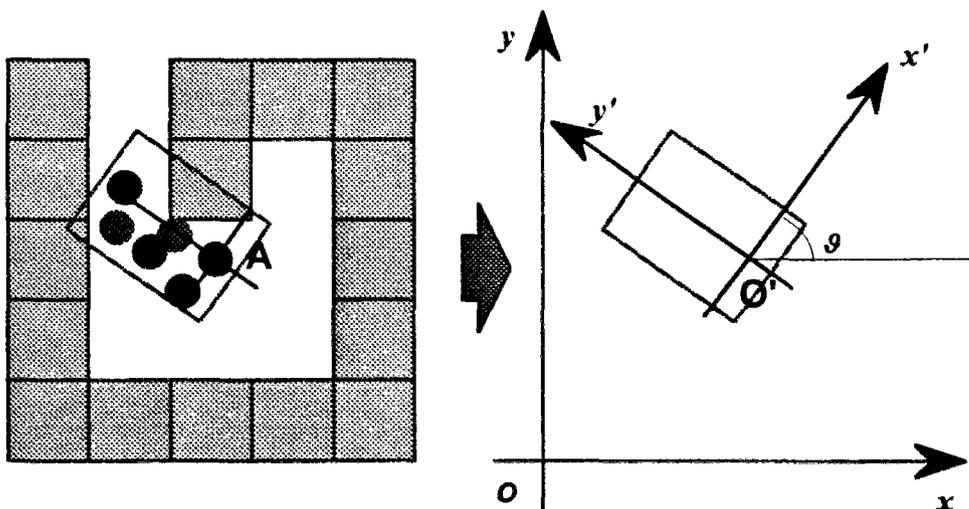


Fig. 74 - Définition d'un système de coordonnées locales.

- Soit A la position de l'occupant examiné, de coordonnées (x_A, y_A) . Soit le vecteur \vec{V} de coordonnées (x_V, y_V) dans le système (O, x, y) . Nous définissons

dans l'espace la transformation suivante, qui permet de déterminer les coordonnées du vecteur \vec{V} dans le système local (O', x', y') :

$$\begin{bmatrix} x'_V \\ y'_V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\vartheta & \sin\vartheta \\ -\sin\vartheta & \cos\vartheta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_V - x_A \\ y_V - y_A \end{bmatrix}$$

- A l'aide de cette transformation, nous exprimons les coordonnées de tout individu par rapport au système local de l'occupant situé en A. Soit un individu K de coordonnées (x_K, y_K) . Nous avons:

$$\begin{bmatrix} x'_K \\ y'_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\vartheta & \sin\vartheta \\ -\sin\vartheta & \cos\vartheta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_K - x_A \\ y_K - y_A \end{bmatrix}$$

L'occupant K sera comptabilisé dans la zone d'influence de l'occupant A si et seulement si:

$$\begin{aligned} -Lx &\leq x'_K \leq Lx \\ -Ly_1 &\leq y'_K \leq Ly_2 \end{aligned}$$

D'un point de vue pratique, afin d'éviter une boucle-test sur tous les occupants ce qui est très pénalisant en temps de calcul, nous avons introduit une technique d'indexation des occupants permettant de repérer rapidement ceux qui sont susceptibles de se trouver dans le rectangle d'influence examiné.

II.2. Calcul de l'aire nette du rectangle de référence

Le calcul de l'aire du rectangle d'influence, après déduction de la surface correspondant aux cases-obstacles, est relativement difficile à effectuer. Nous pouvons le constater sur les deux exemples qui suivent.

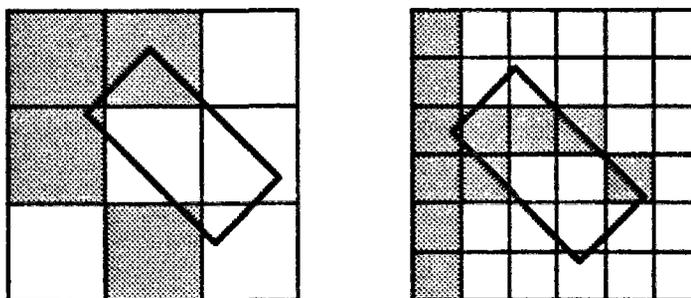


Fig. 75 - Exemples d'intersections complexes rectangle-obstacles

II.2.1. Approche par intégration numérique

Une première approche a été développée avec le concours de Xavier Bodart du Service Feu du CSTB. L'aire à calculer s'exprime sous la forme de l'intégrale suivante:

$$\iint_{(\text{Domaine Plan})} \psi(M) \varphi(M) ds$$

avec:

$$\begin{aligned} \psi(M): \text{Fonction du point } M \text{ de l'espace} & \begin{cases} \psi(M) = 1 \text{ si } M \in \text{rectangle d'influence} \\ \psi(M) = 0 \text{ si } M \notin \text{rectangle d'influence} \end{cases} \\ \varphi(M): \text{Fonction du point } M \text{ de l'espace} & \begin{cases} \varphi(M) = 1 \text{ si } M \notin \text{case-obstacle} \\ \varphi(M) = 0 \text{ si } M \in \text{case-obstacle} \end{cases} \end{aligned}$$

Si l'on calcule l'intégrale directement sur le rectangle d'influence, on a à exprimer:

$$\iint_{(\text{Rectangle})} \varphi(M) ds + \underset{(\text{Ailleurs})}{0}$$

En se référant aux coordonnées locales, on écrit:

$$\int_{-Lx}^{+Lx} \int_{-Ly_1}^{+Ly_2} \varphi(x, y) dy dx$$

Malheureusement, la fonction $\varphi(x, y)$ est dans la majorité des cas difficile à exprimer sous forme analytique. Nous sommes donc amenés à avoir recours à une procédure numérique pour l'intégration.

Le calcul des valeurs de φ en fonction des coordonnées locales (x, y) dans le repère local nécessite le recours à la transformation inverse de celle définie précédemment: depuis le repère local dans lequel est calculée l'intégrale double, vers le repère initial. Il est par la suite facile de déterminer si un point dont on connaît les coordonnées dans ce système appartient à une case-obstacle.

Nous avons initialement eu recours à une des nombreuses fonctions d'intégration disponibles dans la bibliothèque mathématique IMSL. Le temps de calcul étant très insatisfaisant, notamment à cause du nombre très élevé de calculs de surfaces que nous avons à effectuer, nous avons abandonné cette procédure au profit d'un calcul de la surface par simple balayage bidirectionnel du rectangle et sommation des aires

libres comptabilisées ainsi. Le pas habituellement choisi est de 10 cm. Le calcul de l'aire nette est obtenu beaucoup plus rapidement pour la même précision.

11.2.2. Calcul analytique

L'étude de sensibilité du calcul de l'aire nette effectué à l'aide de la méthode précédente a montré qu'il était nécessaire de réduire à 5 cm le côté du carré élémentaire de discrétisation du rectangle de référence, afin d'obtenir une erreur inférieure à 10%, par rapport au calcul analytique de l'aire. D'autre part, le temps de calcul demeure élevé puisque le rectangle est discrétisé en 600 carrés pour les valeurs par défaut de taille du rectangle. Ces éléments nous ont amené à explorer la piste d'un calcul analytique de l'aire nette.

Un calcul analytique suite à un recensement de tous les types d'intersection est très difficile. Il a par conséquent fallu imaginer une procédure générale. L'idée consiste à retrancher à l'aire du rectangle, la surface des intersections éventuelles de celui-ci avec chacune des cases-obstacle, cette intersection formant toujours un polygone convexe.

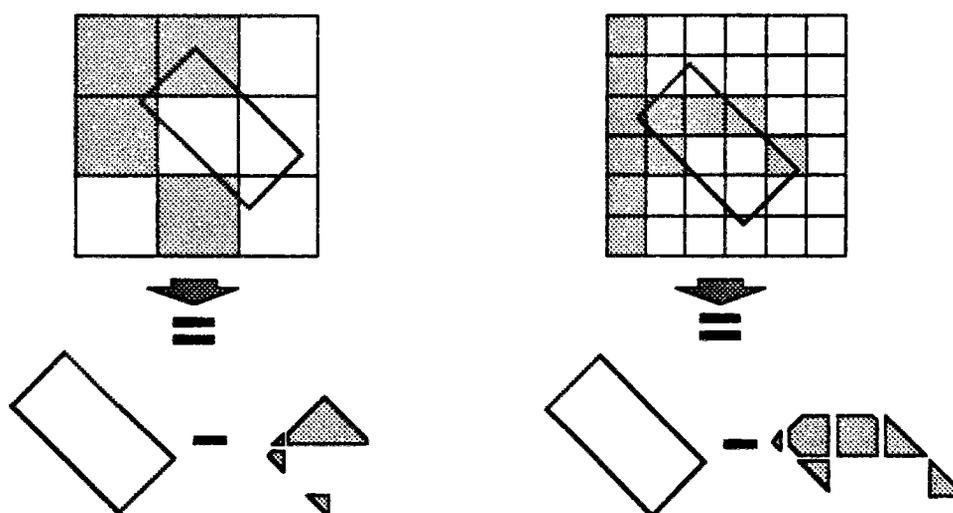


Fig. 76 - Décomposition des intersections du rectangle avec les cases-obstacles

En Annexe 3 nous présentons plus en détail ce mode de calcul de la surface.

II.2.3. Comparaison entre les deux modes de calcul

Le calcul analytique se montre beaucoup plus rapide dans la majorité des cas. Cette méthode présente la particularité de devenir plus lente avec l'augmentation du nombre de cases-obstacles -ce qui peut également résulter du choix d'un maillage plus fin-, alors que la méthode approchée nécessite un temps de calcul constant, puisque le rectangle d'influence est toujours balayé de la même manière. Dans certains cas extrêmes (beaucoup d'obstacles et/ou maillage fin) le calcul numérique approché peut se révéler plus rapide.

III. EXEMPLE DE SIMULATION

Soit une salle de 156m^2 sans obstacles intérieurs, initialement occupée uniformément à une densité relativement faible (1 p/m^2).

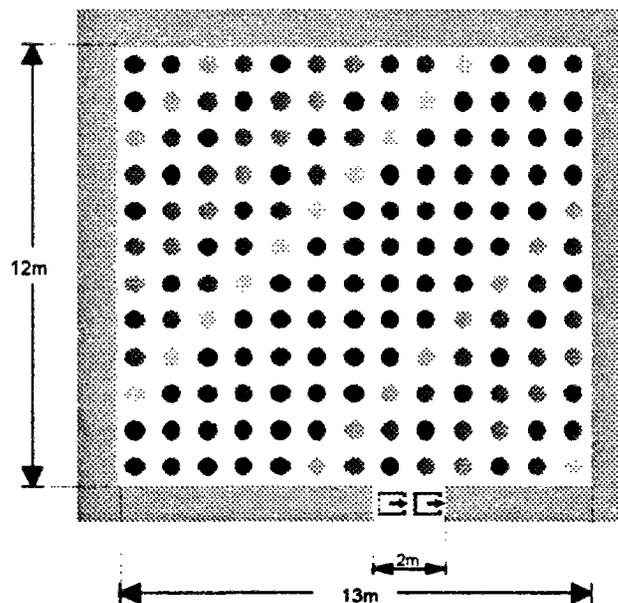


Fig. 77 - Schéma de la salle¹⁴⁹.

Si nous effectuons une simulation à vitesse constante, nous trouvons évidemment que le temps d'évacuation est égal à la distance séparant l'occupant le plus éloigné (celui situé au coin supérieur gauche du schéma) de la sortie, divisée par la vitesse de

¹⁴⁹ Le simulateur par lequel a été générée cette image attribue une couleur différente à chaque disque représentant un individu. Le nombre réduit de couleurs disponibles et le hasard de la configuration présentée sont à la source de l'effet de décalage de la coloration des disques.

déplacement. En supposant que la vitesse est celle proposée par Predtechenskii et Milinskii pour une densité nulle: 0,95m/s (conditions normales), nous obtenons un temps de déplacement du dernier occupant jusqu'à la sortie de 15s.

Si nous introduisons la dépendance de la vitesse vis-à-vis de la densité de la manière dont nous venons de le décrire jusqu'ici, le temps d'évacuation fait plus que doubler, malgré la densité initiale relativement faible: 37s. Les figures suivantes proposent une comparaison du trajet du dernier occupant à vitesse constante (à gauche) et variable (à droite). Dans les deux cas la simulation est effectuée avec un pas de temps de 1s. Pour la simulation avec vitesse variable, nous faisons usage des formules de Predtechenskii et Milinskii pour des conditions normales de mouvement. Les noeuds correspondent aux positions des occupants à chaque pas de temps. Nous remarquons qu'à gauche les noeuds sont équidistants, alors qu'à droite la longueur du pas diminue sensiblement au fur et à mesure que l'occupant se rapproche de la sortie. La vitesse moyenne de l'occupant est de 0,37m/s, au lieu de 0,95m/s.

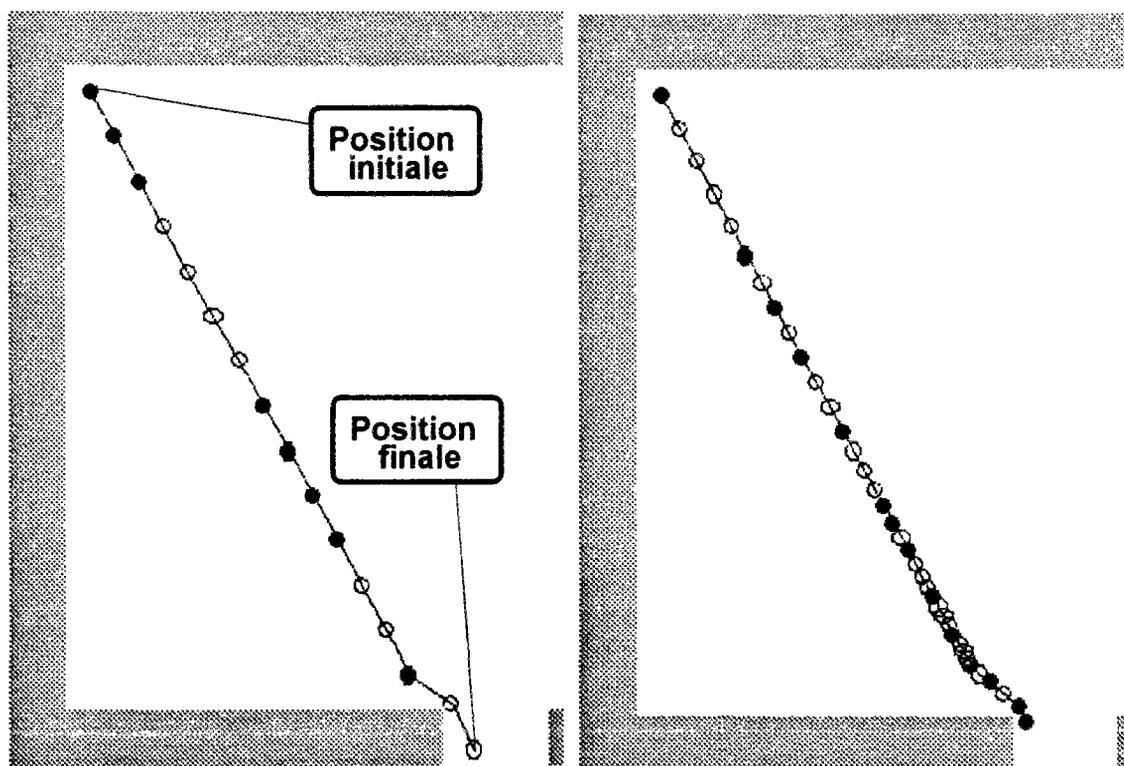


Fig. 78 - Comparaison du cheminement du dernier occupant avec une vitesse constante (à gauche) et variable (à droite). Le pas de temps est de 1s dans les deux cas.¹⁵⁰

¹⁵⁰ Le fait que certains disques ne sont pas remplis est dû à un problème d'affichage, malheureusement non résolu, que nous avons rencontré lors de l'usage de la bibliothèque graphique pour PC

IV. MICRO-OPTIMISATION DU DEPLACEMENT

IV.1. Pertinence du mouvement rectiligne en configuration d'occupation dense

Nous avons montré au chapitre précédent la manière de corriger l'effet de la discrétisation de l'espace sur les itinéraires d'évacuation, et d'obtenir ainsi un mouvement rectiligne. Ce mouvement rectiligne représente-t-il pertinemment le déplacement d'un occupant? A faible densité probablement oui, mais que se passe-t-il quand l'occupant évolue dans un milieu dense? Sur la figure suivante nous voyons les cinq premiers pas de tous les occupants.

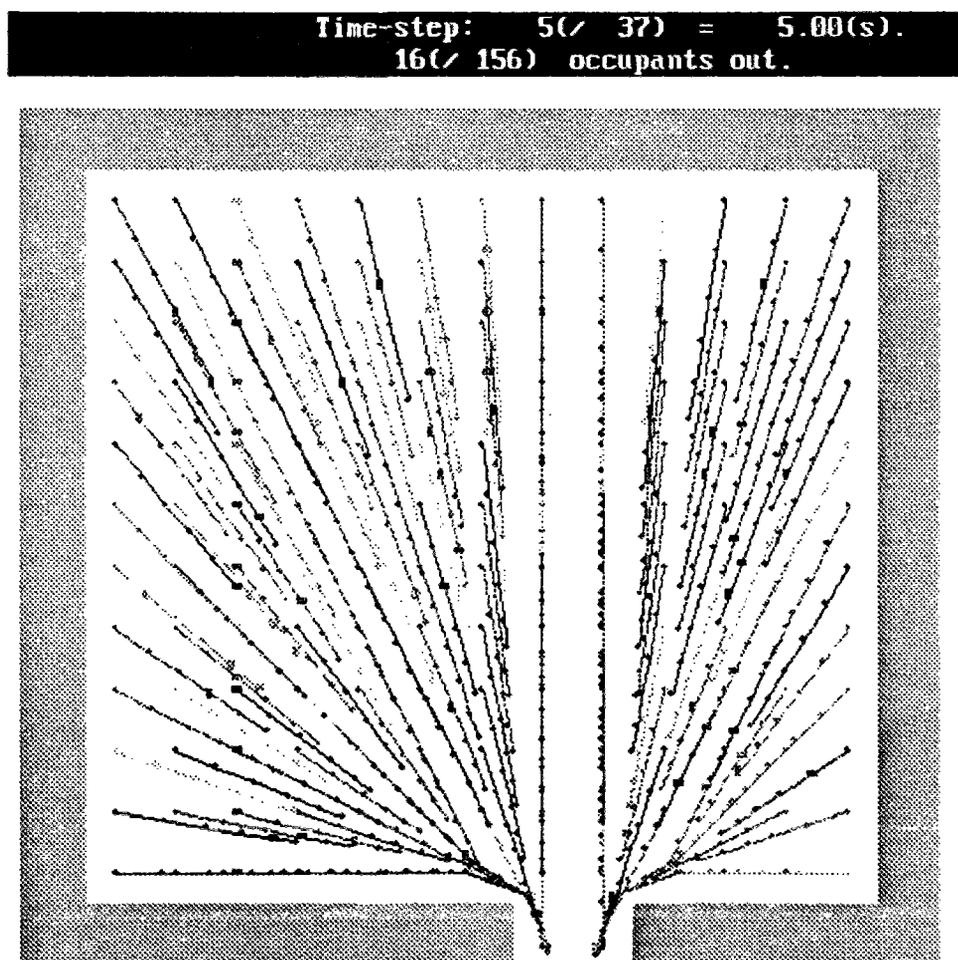


Fig. 79 - Représentation des 5 premiers pas des évacuants.

Le mouvement des individus quand l'espace est densément occupé n'est pas a priori rectiligne. Le cas extrême des figures suivantes met en évidence l'absence de

réalisme de l'hypothèse d'un déplacement rectiligne: les occupant initialement placés l'un derrière l'autre, évacuent en file indienne.

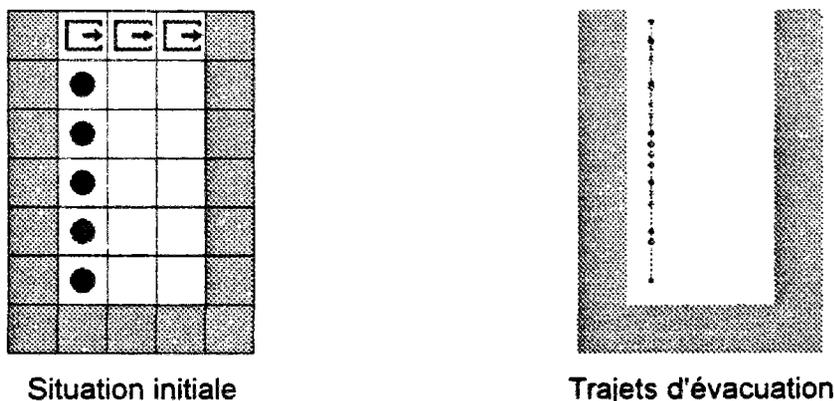


Fig. 80 - Exemple de configuration où les occupants sont initialement placés en file indienne.

Il est plus vraisemblable de considérer que les occupants dévieront légèrement du chemin optimal rectiligne, dans la mesure où cette déviation leur permettra d'atteindre plus rapidement la sortie. Citons à ce sujet, les propos de certains auteurs:

*"Le déplacement des individus en flot dense est toujours non uniforme et souvent aléatoire, à la fois dans le sens du mouvement, et dans la direction transversale à celui-ci."*¹⁵¹

*"Les individus ne demeurent pas alignés l'un derrière l'autre quand ils évacuent. Il se dispersent de manière à assurer une plus grande vitesse de déplacement."*¹⁵²

IV.2. Principe de modélisation

Il y a par conséquent nécessité d'autoriser une plus grande liberté du mouvement par rapport à la ligne droite optimale. Les considérations qui nous ont guidé pour l'introduction de cette "liberté" sont purement intuitives. Nous considérons qu'un évacuant, notamment en conditions d'urgence, est mû par deux "forces motrices", agissant de manière concomitante. L'objectif général est d'atteindre la sortie le plus rapidement possible. L'accomplissement de cet objectif passe éventuellement par deux stades d'optimisation: le choix de la sortie la plus proche, et le choix du chemin le plus court menant à la sortie choisie, que celle-ci soit la plus proche ou non. Si ces

¹⁵¹ p.24-25 de [PREDECHENSKI 78]

¹⁵² p. 821 de [FAHY 91]

hypothèses sont discutables d'un point de vue comportemental, il est par contre assez vraisemblable qu'à chacun de ses pas, l'individu tendra à satisfaire l'objectif général au moyen d'une attitude optimisante, visant à établir un micro-agencement par rapport à ses voisins tel que l'individu se rapproche le plus de sa cible de déplacement. Concrètement cela peut s'exprimer par une déviation par rapport à la ligne droite de manière à se retrouver dans une zone de densité moindre, et où la vitesse peut par conséquent être plus élevée.

A un couple (occupant, cible) nous avons pour l'instant fait correspondre une densité locale, à partir de laquelle nous pouvons calculer une vitesse de déplacement. Si, depuis la même position initiale de l'occupant, nous balayons toutes les directions de l'espace, nous trouvons une "densité locale" différente dans chaque direction. Nous pouvons donc définir à la fois une fonction directionnelle de densité et à partir de celle-ci une fonction directionnelle continue de la vitesse de l'occupant en fonction de la direction de l'espace: $v=f(\alpha)$. Si nous multiplions cette vitesse "directionnelle" par le pas de temps, nous obtenons le contour d'une région du plan qui représente l'ensemble des points accessibles en un seul pas de temps pour l'occupant examiné. L'idée consiste à choisir dans cette zone le point le plus proche du but, au lieu de déplacer systématiquement l'occupant en ligne droite vers son but.

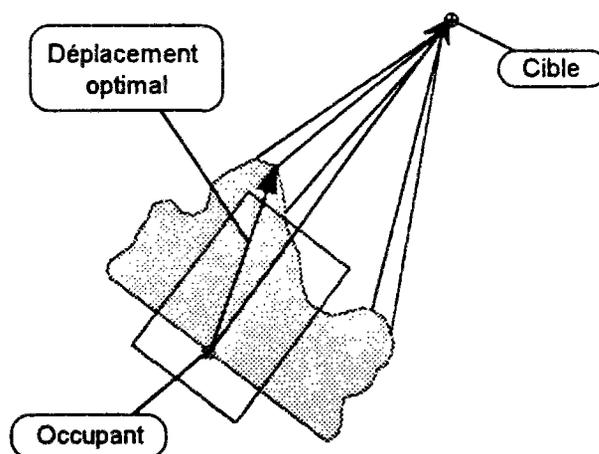


Fig. 81 - Définition de la zone accessible en un pas de temps.

Les micro-perturbations que nous introduisons ainsi sont censées correspondre aux petits mouvements déviant de la ligne droite accomplis par une personne qui se déplace dans une zone à forte densité, et lui permettent d'éviter d'autres occupants et de combler un "trou" éventuel devant elle pour progresser plus rapidement vers la sortie.

IV.3. Aspects numériques du calcul des vitesses directionnelles

Dans la pratique, l'établissement de la fonction continue étant impossible, nous sommes contraints de discrétiser le balayage de l'espace selon un pas d'angle déterminé. Il est tout d'abord évident qu'il suffit de n'examiner que le demi-espace devant l'occupant, dans la direction de l'intention de déplacement.

Les nombreux tests que nous avons effectués ont montré qu'il était possible de retenir un pas d'angle de $\pi/12$ (7.5°). Ceci signifie que nous retenons 13 directions primaires de déplacement, et qu'il faut calculer autant de densités locales "directionnelles", d'où l'importance du temps de calcul de ces densités. Dans un deuxième temps, pour la détermination du pas optimal, nous utiliserons des vitesses directionnelles pour des pas d'angle intermédiaires par interpolation entre ces directions primaires.

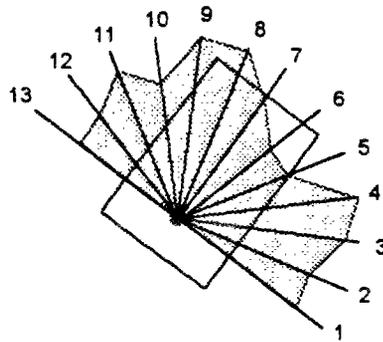


Fig. 82 - Directions primaires de calcul de la densité locale.

La figure suivante présente un cas concret de calcul de la zone accessible en un seul pas de temps.

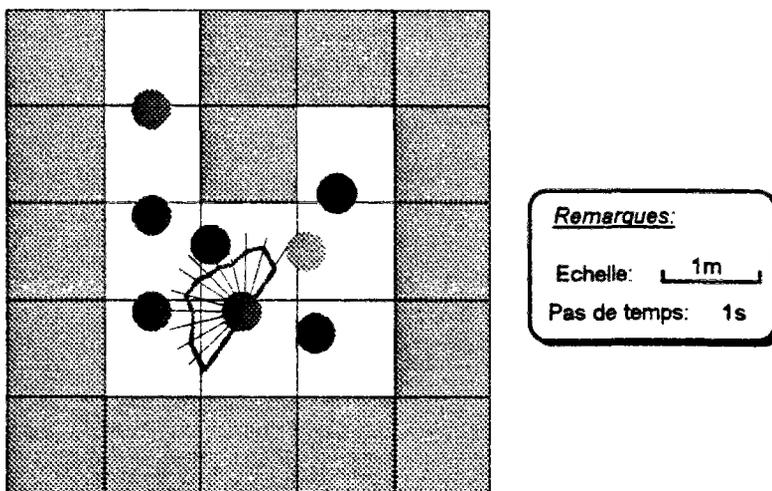


Fig. 83 - Exemple de cas concret de zone accessible issu d'une simulation.

IV.4. Restrictions aux obstacles

Le fait d'autoriser le déplacement dans une direction autre que celle de la ligne droite reliant l'occupant et la cible de son déplacement peut être la source de problèmes graves, s'exprimant notamment par le risque de déplacement d'un occupant dans une case-obstacle.

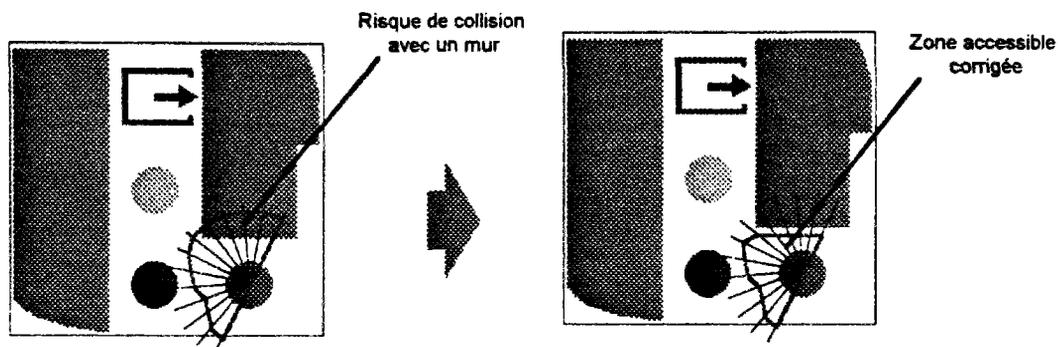


Fig. 84 - Restriction de la zone accessible de manière à empêcher le déplacement d'un occupant dans une case-obstacle.

Il faut par conséquent lors de l'établissement de la "zone accessible", réduire éventuellement la longueur des pas de manière à empêcher le déplacement d'un occupant dans une case-obstacle.

Cette correction que nous décrivons ici pour des raisons pédagogiques n'est pas effectuée "une fois pour toutes", mais n'a lieu que pour les directions scrutées lors de la phase de détermination du micro-pas optimal que nous décrivons plus loin.

La correction suit les mêmes principes que le calcul de visibilité:

- Une zone de 15cm autour des cases-obstacles est considérée interdite.
- Pour une direction donnée, nous examinons si le segment de droite représentant le pas de l'occupant est intercepté par le côté d'une case-obstacle ($\pm 15\text{cm}$). S'il y a intersection, on tronque jusqu'à celle-ci le pas que peut effectuer l'occupant dans la direction donnée.

IV.5. Aspects numériques de la recherche du pas optimal

A chaque pas de temps et pour chaque occupant nous devons déterminer le pas optimal de celui-ci, c'est à dire le point de la zone accessible le plus proche du but.

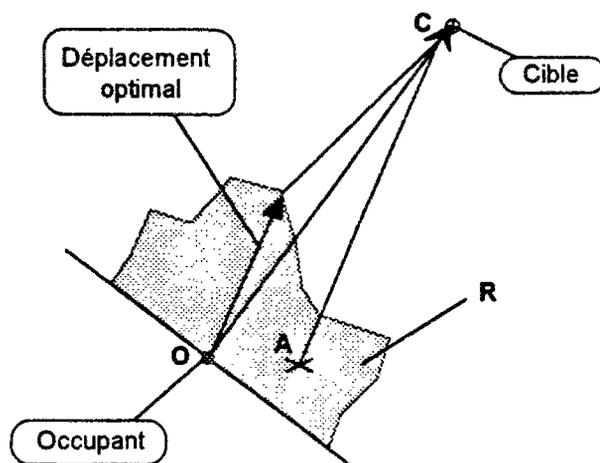


Fig. 85 - Détermination du pas optimal.

Soient (x_A, y_A) et (x_C, y_C) les coordonnées respectives de A et C, nous cherchons:

$$\min_{A \in R} dist(A)$$

avec:

$$dist(A) = (x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2$$

Il est important à ce point de préciser les raisons qui nous font rechercher la solution du pas optimal dans toute la région R, et pas seulement sur le contour de celle-ci:

1. Il existe des cas, rares il est vrai, où la forme de la zone accessible et la distance à la cible font que le point le plus proche peut ne pas se situer sur le contour. Indépendamment de la forme de la région, plus la cible est éloignée et plus il est improbable que le point optimal ne se situe pas sur le contour.
2. L'exploration de toute la région sera de toute façon indispensable lors d'une phase ultérieure où nous introduirons des contraintes de densité maximale d'occupation.

Nous allons décrire la région R à l'aide d'un système particulier de variables polaires. Soit la fonction connue $l_{max}(\alpha)$, représentant le pas maximal depuis la position O dans la direction α , cet angle étant défini comme sur le schéma ci-dessous.

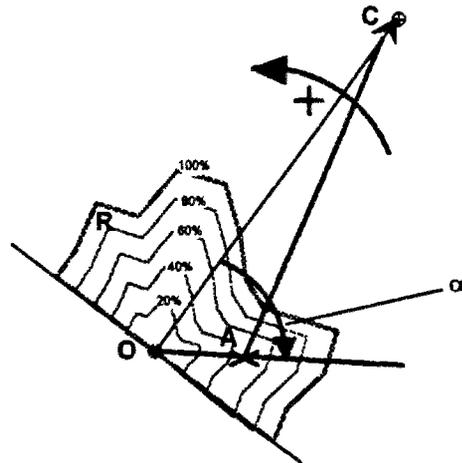


Fig. 86 - Recherche du couple (α, f) rapprochant le plus du but.

En introduisant la variable f , qui représente la fraction "utilisée" de $lmax$, nous décrivons ainsi la région accessible R:

$$R: \quad -90^\circ \leq \alpha \leq +90^\circ \\ 0 \leq f \leq 1$$

La détermination du pas optimal équivaut à celle de la valeur des deux variables indépendantes α et f :

$$\min_{\substack{-90^\circ \leq \alpha \leq +90^\circ \\ 0 \leq f \leq 1}} dist(\alpha, f)$$

avec:

$$\begin{cases} x_A = x_O + f \cdot \cos(\alpha) \cdot lmax(\alpha) \\ y_A = y_O + f \cdot \sin(\alpha) \cdot lmax(\alpha) \end{cases} \\ dist = (x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2$$

La solution n'étant pas évidente, nous nous sommes orientés vers le recours à un solveur numérique. Nous avons essayé plusieurs fonctions proposées dans la bibliothèque IMSL, mais les résultats ne furent pas satisfaisants, en partie à cause des problèmes posés par les trop nombreux minima locaux, mais surtout du point de vue du temps de calcul. Les nombreux tests que nous avons effectués nous ont permis de constater que la recherche du minimum de la fonction à l'aide d'une simple double boucle faisant varier α et f assurait, à précision comparable, un temps de calcul moindre. Concrètement, la recherche est effectuée en deux phases:

1. Double boucle primaire: α varie de -90° à $+90^\circ$ avec un pas de 10° .

f varie de 0 à 1 avec un pas de 0.1.

2. Double boucle secondaire autour de la solution du pas précédent:

α varie de -5° à $+5^\circ$ avec un pas de 1° .

f varie de -0.05 à $+0.05$ avec un pas de 0.01.

Cette procédure ne présente évidemment pas de problèmes de convergence et opère au plus $(180/10+1) \cdot 11 + 11 \cdot 11 = 330$ évaluations de la fonction *dist* pour aboutir à une solution optimale.

C'est à ce stade qu'intervient la troncature éventuelle du pas, s'il vient à rencontrer une case-obstacle.

Enfin, cette procédure suppose que l'on dispose de la valeur de $l_{max}(\alpha)$ quel que soit α , or nous avons montré que nous ne l'avons directement calculée que pour des valeurs discrètes (avec un pas de 7.5°), notamment à cause des problèmes de temps de calcul posés. Nous définissons l_{max} comme une fonction continue sur tout le domaine $[-90^\circ, 90^\circ]$ par le recours systématique à une procédure d'interpolation d'angle à partir des 13 valeurs disponibles. L'interpolation n'est pas linéaire, la solution finalement utilisée constitue une contribution de Xavier Bodart du Service Feu du CSTB. Cette solution est proposée en Annexe 4.

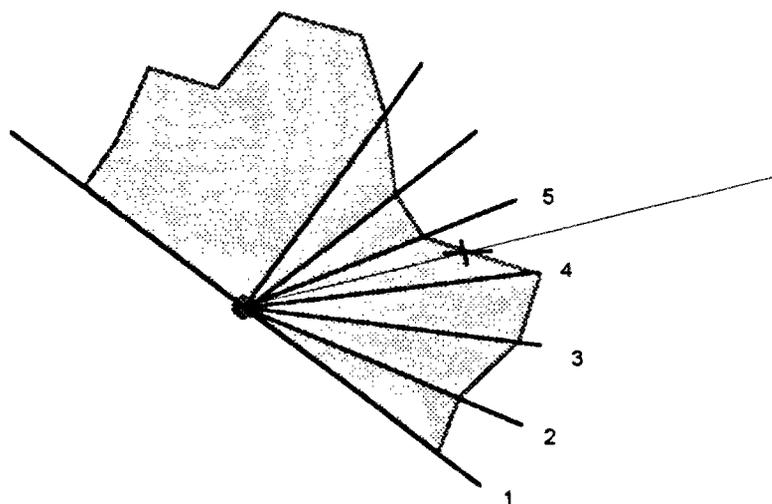


Fig. 87 - Interpolation pour la détermination du pas maximal dans une direction quelconque.

IV.6. Exemples

Examinons en premier lieu un exemple pour lequel les occupants sont initialement placés les uns derrière les autres [Fig. 88].

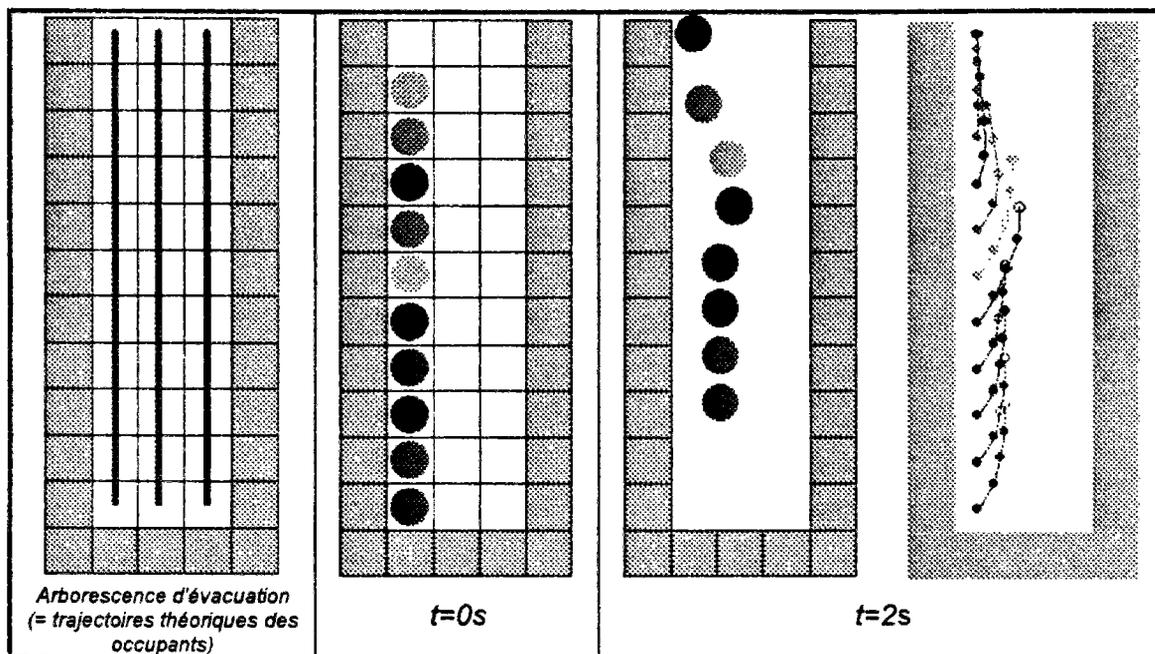
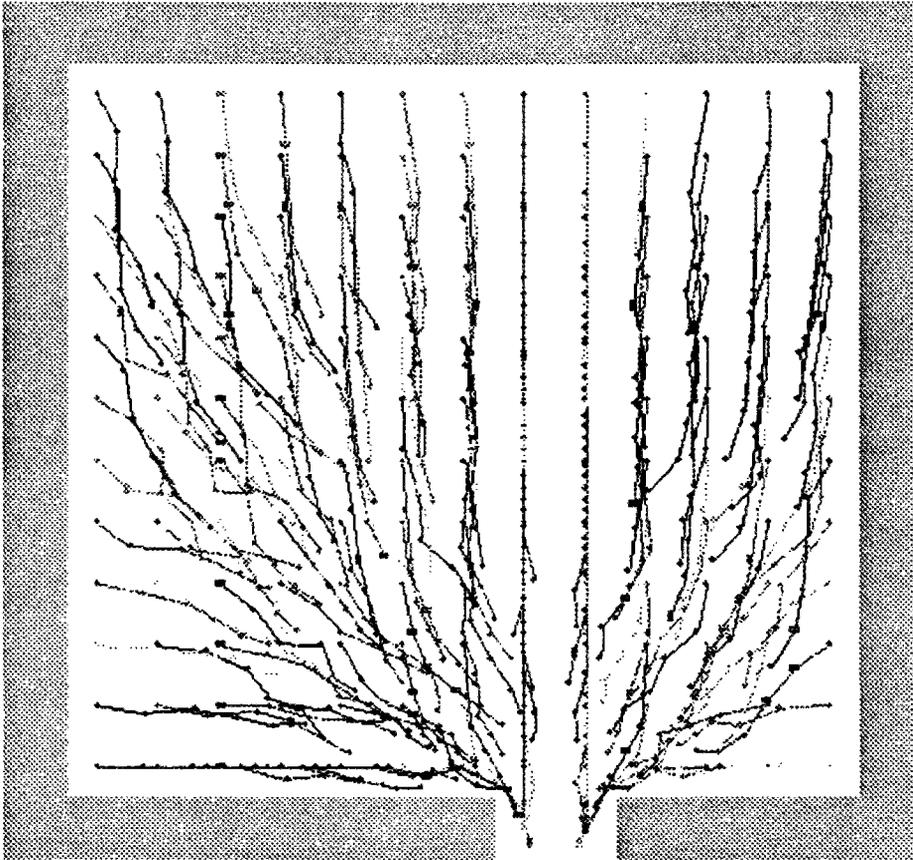


Fig. 88 - Exemple de configuration où les occupants sont initialement placés en file indienne. (Largeur de la maille=0,5m.)

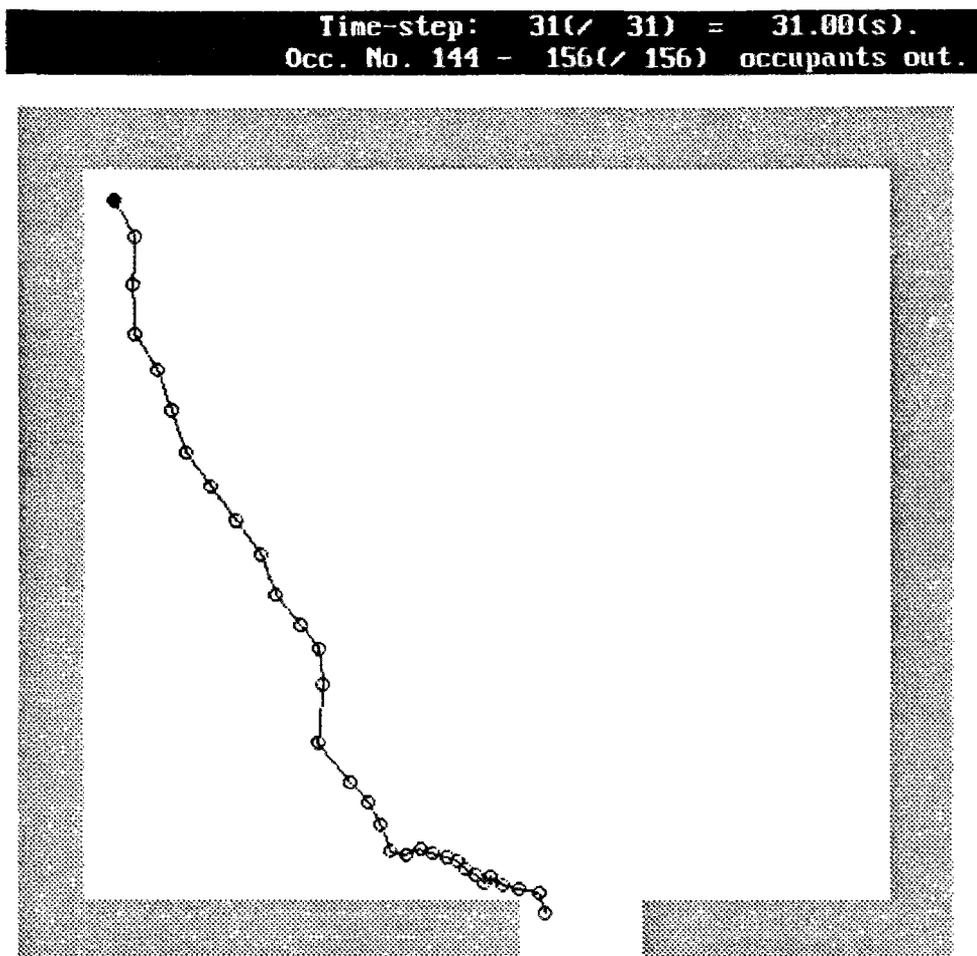
Nous remarquons que, cette fois-ci, la disposition initiale n'est plus respectée au cours du mouvement d'évacuation: les occupants dévient de la ligne droite afin de pouvoir se déplacer plus rapidement vers la sortie. Le temps d'évacuation est 7.5s au lieu de 8.5s si les occupants sont contraints de se déplacer en ligne droite. Soulignons également que ces déviations peuvent amener les individus à "sauter" de branche dans l'arborescence d'évacuation, et suivre finalement un chemin différent de celui découlant de leur position initiale.

Sur la figure suivante est présenté l'exemple de la salle de 156m² de la p.188 initialement occupée par 1 personne par m².

Time-step: 5(/ 31) = 5.00(s).
17(/ 156) occupants out.



Outre les micro-déviations, nous constatons que le temps total d'évacuation est passé de 37 secondes à 31 secondes. Sur la figure suivante nous pouvons observer le cheminement complet du dernier évacuant. Ces deux figures sont à rapprocher de celles proposées précédemment dans ce chapitre concernant le mouvement rectiligne.



*Fig. 89 - Déplacement "micro-optimisé" à vitesse variable
de l'occupant le plus éloigné.*

Il est intéressant de comparer la distance parcourue et la vitesse moyenne de cet occupant pour les deux types de mouvement:

	<i>Temps de déplacement</i>	<i>Distance parcourue</i>	<i>Vitesse moyenne</i>
<i>Mouvement "raide"</i>	37s	13.5	0.37m/s
<i>Mouvement "micro-optimisé"</i>	31s	15	0.48m/s

Alors que la distance parcourue a augmenté, le temps d'évacuation a diminué: la vitesse moyenne a augmenté de 30% environ.

V. RAIDEUR

Pour clore ce chapitre, nous allons mentionner une dernière intervention mineure sur le mode de déplacement des occupants, allant dans le sens inverse de la liberté absolue de choix de la direction du mouvement. Nous considérons en effet qu'il est utile d'introduire une certaine "raideur" dans le mouvement de l'occupant pour prévenir de trop nombreuses oscillations.

Le principe de raideur que nous introduisons consiste à restreindre l'angle balayé pour la recherche du point optimal de déplacement. Cette restriction sera fonction de deux éléments:

- La durée du pas de temps. Plus le pas de temps est petit, plus il faut restreindre la possibilité de rotation de l'occupant au cours d'un seul pas de temps.
- La direction du déplacement au pas de temps précédent.

Nous introduisons un paramètre exprimant l'angle de rotation maximal d'un occupant durant une seconde. La valeur de ce paramètre que nous utilisons est de 90° par seconde. Ceci signifie pratiquement que si le pas de temps est de 0.5s, un occupant ne peut se déplacer au cours du pas de temps selon un angle supérieur à 45° par rapport au mouvement correspondant au pas de temps précédent. Nous imposons cependant la condition que la direction du déplacement de l'occupant vers sa cible appartienne toujours à l'espace balayé.

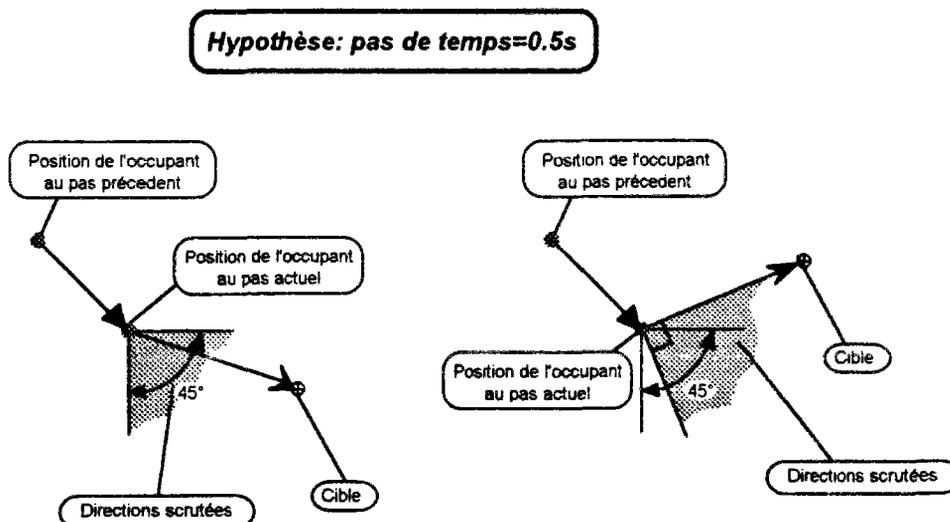


Fig. 90 - Exemples de calcul de l'angle de recherche du pas optimal.

A ce stade de développement du modèle, l'introduction de cette "raideur de rotation" est pratiquement sans effet sur les cheminements des occupants.

C H A P I T R E 7 :

O P T I M I S A T I O N A L ' A I D E D ' U N

C R I T E R E D E T E M P S

I. POINT SUR LE DEVELOPPEMENT DU MODELE

Les divers éléments que nous avons présentés jusqu'à présent nous ont permis de développer un modèle d'évacuation présentant les caractéristiques suivantes:

- Le site modélisé peut être quelconque (grande salle, centre commercial, labyrinthe,...). Il est représenté à l'aide d'un plan 2D discrétisé.
- Les occupants suivent le chemin le plus court vers la sortie la plus proche.
- La vitesse de déplacement dépend de la densité locale dans la direction du mouvement.
- A chaque pas de temps, les occupants effectuent le pas les rapprochant le plus de leur but.

A ce stade de développement du modèle, nous nous sommes heurtés à un problème qui n'avait pas été estimé à sa juste importance au début de ce travail: la nécessité d'introduire, dans la procédure de recherche des chemins minimaux, un critère d'optimisation dépendant si possible du temps, au lieu simplement de la distance.

Deux éléments, qui ne sont pas véritablement différents, suscitent ce besoin:

1. Le premier découle de considérations comportementales: quand il existe un déséquilibre flagrant d'occupation et/ou de dimension des issues, il est certain que les occupants auront tendance à se répartir aux sorties en fonction du débit et de la charge de celles-ci, et non selon une simple logique de distance minimale. L'exemple extrême suivant présente le cas d'une salle où *tous les occupants* se trouvent initialement plus près d'une même sortie, qui de surcroît est *la sortie la plus étroite*.

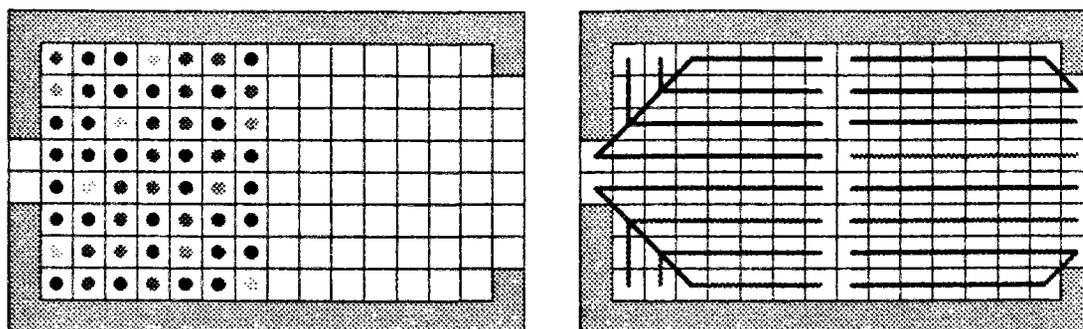
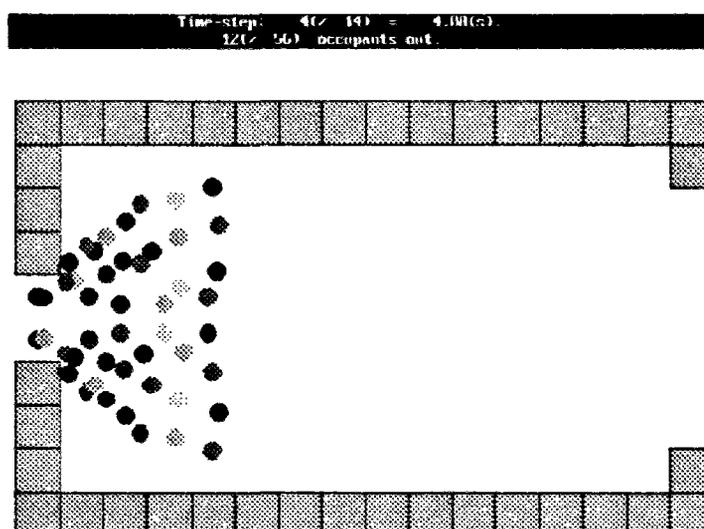


Fig. 91 - Situation initiale et chemins d'évacuation d'une configuration présentant un déséquilibre initial important.

La simulation à l'aide du modèle-simulateur développé jusqu'à ce stade donne l'image présentée à la figure suivante d'une évacuation de cette salle.



*Fig. 92 - Evacuation depuis un site présentant un déséquilibre initial important.
Tous les occupants évacuent du même côté, par la sortie la plus étroite.*

2. Un second type de problème résulte d'effets pervers induits par la discrétisation spatiale, en association avec le principe de déplacement suivant le chemin le plus court en longueur. Il existe des configurations où le recours à une procédure d'optimisation pour la génération des chemins d'évacuation de chaque occupant, amène les évacuants à converger vers certaines cases du maillage, ce qui va susciter des bouchons importants.

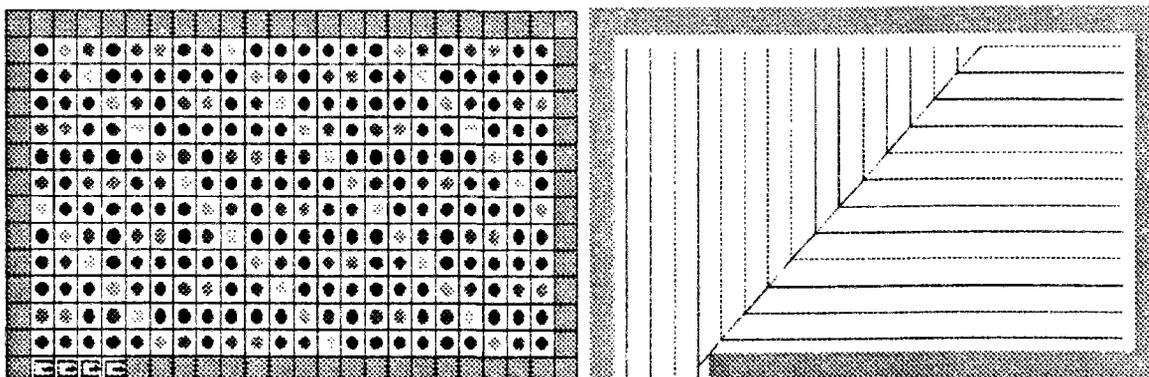


Fig. 93 - Site pour lequel les chemins optimaux convergent en certaines cases du maillage. Dimensions intérieures: longueur=22m; largeur=13m. Densité: 1p/m².

Sur l'exemple ci-dessus, 87% (228/264) des occupants utiliseront la case-sortie la plus à droite, et 82% auront comme point de passage obligatoire la case située juste au-dessus et à droite de la précédente. Les micro-déviations introduites au chapitre précédent permettent d'atténuer dans une faible mesure ce problème.

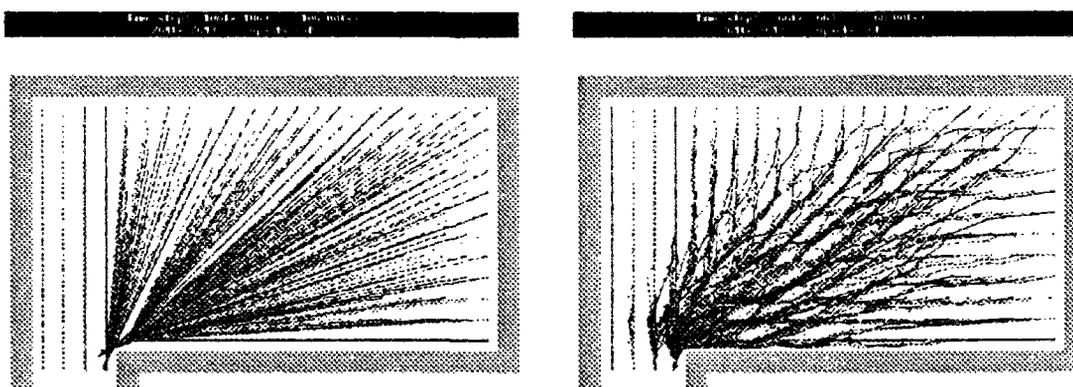


Fig. 94 - Evacuation "raide" (à gauche) et avec "micro-perturbations" (à droite). Pas de temps=1s. Dans les deux cas la majorité des occupants évacue par la case la plus à droite.

Le tableau suivant nous renseigne sur le temps total d'évacuation et la répartition des occupants aux issues obtenues avec les deux approches.

	Mouvement "raide"	Mouvement "micro-optimisé"
Temps total d'évacuation	106s	66s
Répartition aux issues	5% 5% 5% 85%	5% 5% 10% 80%

Sur cet exemple, il est clair que les micro-déviations ne suffisent pas à empêcher l'entassement des occupants sur la "corde" du virage final avant la sortie. La

correction de ce phénomène nécessiterait l'introduction de déviations de plus grande portée.

Nous constatons donc que la logique du chemin le plus court en distance est tout à fait insuffisante, notamment dans le cadre d'une représentation fine de l'environnement, qui n'intègre pas de modélisation implicite comme le font les réseaux classiques. Nous allons présenter dans ce chapitre les moyens mis en oeuvre pour traiter ce problème.

II. DISCUSSION

Il est certain que le choix d'hypothèses de travail pour le traitement des deux aspects décrits ci-dessus expose à des risques importants étant donné l'impossibilité de dégager des règles précises de comportement de la foule en fonction de la configuration (occupation, dimensions des issues, distances). Nous avons notamment montré dans le premier chapitre à quel point était compliquée la représentation des phénomènes inhérents à l'orientation spatiale des occupants.

Si pour certaines configurations extrêmes, il est assez probable que les occupants se répartiront d'eux mêmes de manière à évacuer le plus rapidement, selon donc un critère de temps, il existe de très nombreux cas intermédiaires pour lesquels il est difficile d'avoir une intuition sur la manière dont les choses pourraient se présenter lors d'une évacuation réelle. Il est d'ailleurs certain que l'évacuation dans ces cas de figure ne répond pas à un déterminisme intrinsèque, et dépendra fortement de divers facteurs aléatoires de contexte, comme ceux présentés au premier chapitre. Nous approchons par conséquent des limites du déterminisme. Mais envisager une approche non déterministe suppose de connaître au moins les "distributions" des phénomènes majeurs que l'on souhaite reproduire; or ce n'est pas le cas.

Examinons de plus près certains cas intermédiaires pour s'interroger sur la pertinence d'une répartition optimale des occupants, et/ou jusqu'à quel "degré" cette répartition pourrait avoir lieu.

II.1. Cas de la disproportion issues/occupation

La difficulté de modélisation peut s'exprimer à travers les questions suivantes suscitées par l'examen de certaines configurations:

1. Que se passera-t-il s'il n'y a pas de contact visuel direct avec la sortie la plus large?
2. si la sortie la plus large se trouve à une distance sensiblement supérieure à la sortie la plus étroite?

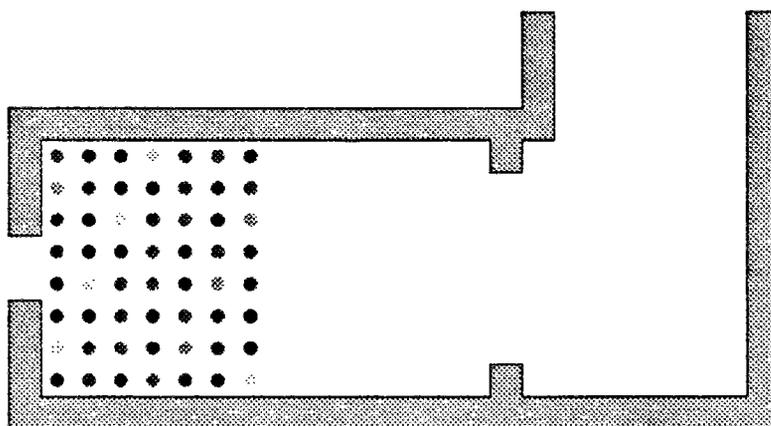


Fig. 95 - La sortie la plus large n'est pas directement visible et est sensiblement plus éloignée que la sortie la plus étroite.

3. si une restriction se présente sur le chemin menant à la sortie la plus large?

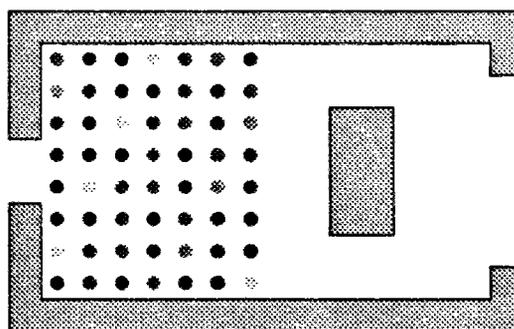


Fig. 96 - Le chemin vers la sortie la plus large comporte une restriction.

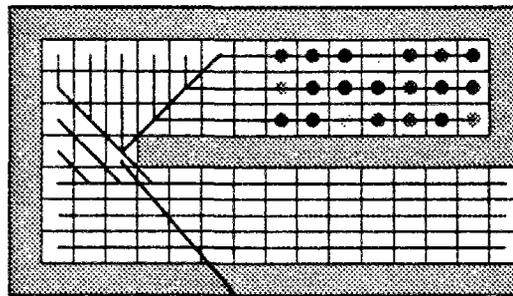
Nous remarquons que nous venons de nous référer aux 3 éléments majeurs que nous avons rencontré dès le début de la présentation des travaux relatifs à l'évacuation, à l'occasion de l'examen de la formule de Togawa:

1. La composante "transport" du mouvement, fonction de la distance: L/V .
2. La composante "capacité" du mouvement: N/Q .

3. La nécessité d'examiner tout le cheminement d'évacuation pour d'éventuelles restrictions, et non seulement la capacité des issues finales.

II.2. Cas du virage

Soit un élément de circulation longitudinal présentant un coude [Fig. 97].



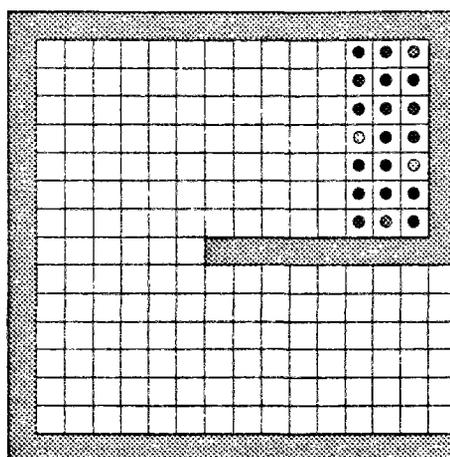
Point de convergence de tous les occupants
selon une logique de distance minimale
(taille de la maille=1m)

Fig. 97 - Couloir étroit présentant un coude. Il est à noter qu'il n'est pas nécessaire que le coude soit important pour que les chemins optimaux convergent vers une branche principale.

Si le couloir est étroit comme sur la figure précédente (3m), il semble légitime de supposer qu'à peu près toute la largeur sera utilisée. Citons à nouveau Melinek et Booth¹⁵³:

"Les angles et les coudes n'ont pas d'influence sur le débit. La vitesse diminue et la densité augmente à l'intérieur du virage. A l'extérieur, la vitesse augmente et la densité diminue."

Mais, si la largeur de la circulation augmente, et que du couloir nous passons progressivement à un élément du type hall, est-ce que ceci demeure vrai?



(taille de la maille=1m)

Fig. 98 - Situation pour laquelle il est improbable que toute la largeur du virage soit utilisée par les occupants.

Nous voyons par conséquent qu'il existe une difficulté réelle de prédiction de la portée de la répartition optimale qu'auront naturellement tendance à établir les évacuants de manière à évacuer le plus rapidement possible. Ceci bien sûr pose des problèmes majeurs de modélisation.

Pour exagérer un peu, le modélisateur se trouve devant un cas de conscience:

- Faut-il s'arrêter là et dire que, puisque il est difficile de modéliser, en l'état actuel des choses, des phénomènes aussi flous, il vaut mieux ne rien faire?
- Faut-il au contraire essayer de repousser les limites d'une approche par modélisation, et imaginer des "astuces" permettant de contourner cet écueil en générant des comportements qui, d'un point de vue purement qualitatif et d'intuition, semblent pertinents, tout en demeurant conscient des hypothèses mobilisées; et quitte à manipuler, par la suite, avec extrême précaution les résultats obtenus?

Nous n'avons bien sûr pas résisté à la tentation d'explorer la seconde voie.

D'ailleurs, même s'ils n'en indiquent pas toujours les hypothèses sous-jacentes et les limites qui en découlent, n'est-ce pas, dans une certaine mesure et à des degrés divers, ce que font implicitement ou explicitement tous les modèles existants d'évacuation, quand ils introduisent soit une arborescence d'évacuation, soit un "routage" a priori (selon le terme introduit par Lardeux)? N'est-ce pas ce à quoi servent les utilitaires de génération de routage dans AGORA (routage aléatoire, à distance minimale, à répartition prédéfinie des occupants par issue)? L'hypothèse

d'utilisation maximale de toutes les issues dans EVACNET et le modèle de Tanaka n'équivaut-elle pas à une hypothèse de répartition optimale des occupants?

III. DEFINITION DU PROBLEME ET SOLUTIONS ELABOREES

Le problème ne se pose pas comme une simple répartition proportionnelle des occupants aux issues. Ceci négligerait:

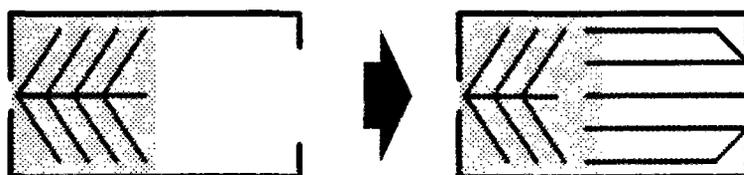
1. la distance qu'il faut parcourir pour atteindre chaque sortie,
2. la présence d'éventuelles restrictions sur le trajet vers chacune des issues,
3. le scénario d'occupation du site. Si, par exemple, la densité est faible, alors il n'y a pas d'embouteillages, et l'évacuation en temps minimal correspond à l'usage des chemins les plus courts en distance.

L'idée que nous avons poursuivie est d'essayer de prendre en compte tous ces facteurs de manière à établir une estimation du temps nécessaire pour évacuer, en fonction de la position initiale et du chemin suivi. Cette estimation du temps remplacera le critère de distance dans la procédure de recherche des chemins optimaux. Nous espérons obtenir ainsi des itinéraires d'évacuation plus vraisemblables.

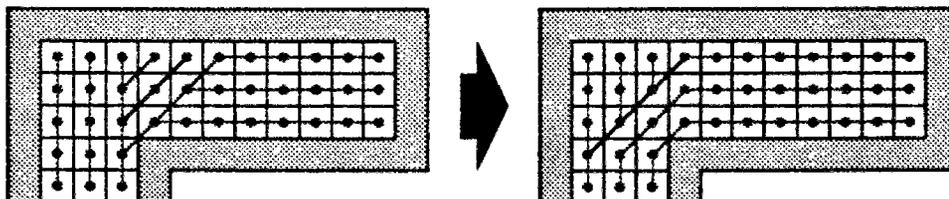
Il est important à ce point de souligner le paradoxe fondamental de cette démarche: nous voulons générer des chemins d'évacuation qui seront utilisés par un simulateur d'évacuation, à partir d'une prévision du temps nécessaire pour évacuer. Or si nous pouvons disposer d'une "bonne" estimation de ce temps, alors pourquoi aurions-nous recours à une procédure de simulation?... Ceci explique le fait que nous avons finalement développé des approches heuristiques pour ce critère d'estimée du temps nécessaire pour évacuer.

Rappelons les deux aspects du problème que nous devons résoudre:

1. Choix d'une autre sortie que la plus proche, suivant le site et l'occupation.



2. Modification de l'arborescence de manière à empêcher l'affluence en un seul point de confluence d'un trop grand nombre de branches d'évacuation.



Nous avons imaginé et mis en oeuvre plusieurs algorithmes heuristiques pour la recherche de chemins optimaux au sens du temps. Nous devons souligner que nous avons tenu à ne pas nous écarter du cadre de la procédure de Dijkstra, telle que nous l'avons utilisée jusqu'à présent, pour l'établissement de ces chemins optimaux. Ceci signifie, entre autres, que nous recherchons un chemin optimal *par récurrence* (à cause des hypothèses de déplacement retenues), en démarrant des sorties et en connectant au fur et à mesure les cases rencontrées aux cases déjà résolues, parmi les cases avoisinantes.

Ce principe de récurrence pose des limitations importantes, que nous pouvons décrire de deux manières différentes:

1. Un occupant est obligé de suivre le chemin préétabli d'un des occupants se trouvant devant lui.
2. Lors de l'établissement progressif de l'arborescence d'évacuation il est impossible d'anticiper afin de prendre en compte la partie non traitée du site. La figure suivante propose un exemple explicatif. Ce phénomène est d'ailleurs la raison principale pour laquelle la recherche des chemins optimaux sera reeffectuée à chaque pas de temps.

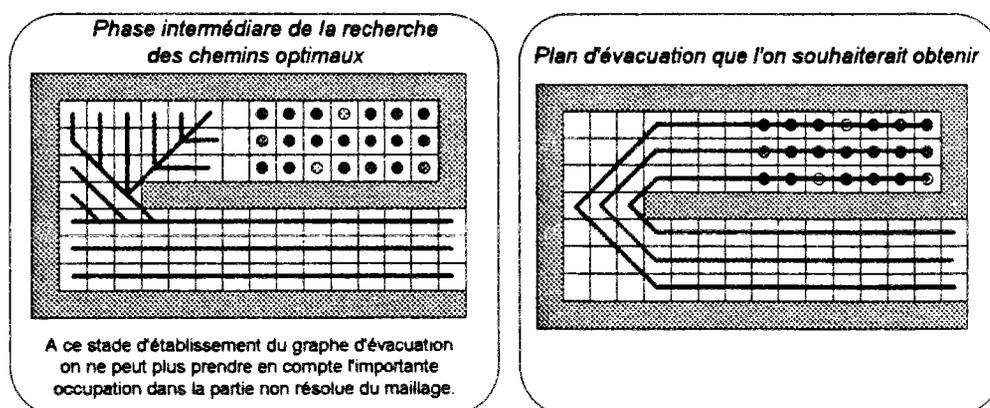


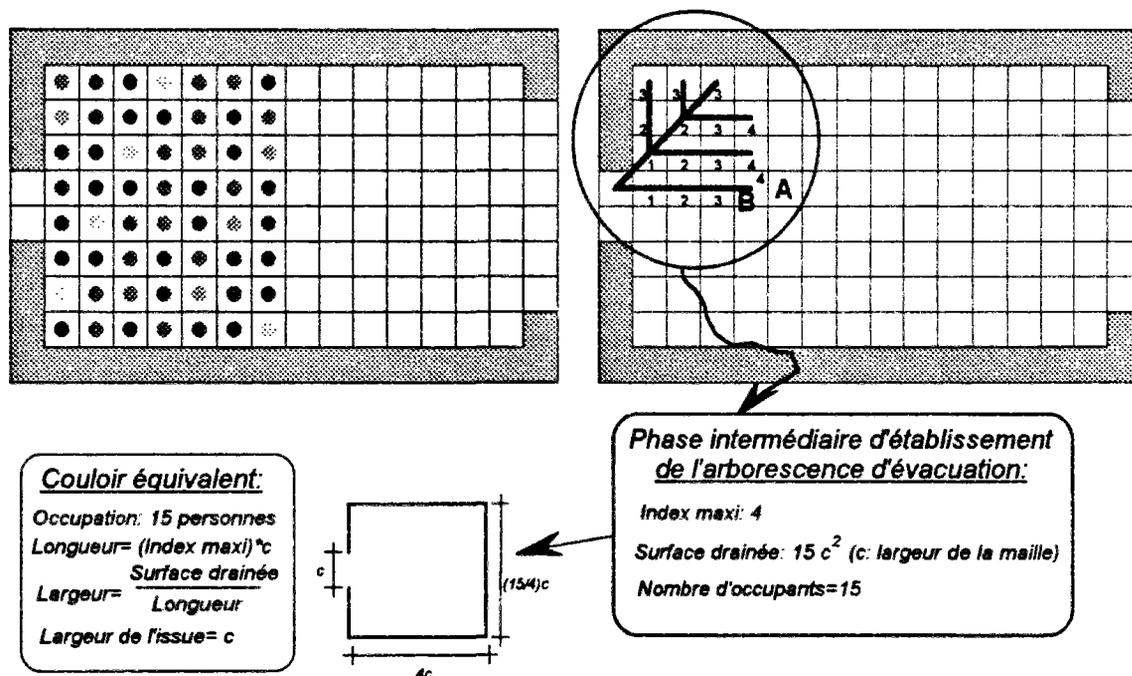
Fig. 99 - Difficultés posées par la récurrence lors de la recherche des chemins optimaux.

Il est certain que des solutions plus performantes et moins "heuristiques" doivent être envisageables, au prix d'un bouleversement important de la manière d'appréhender le problème. Dans le cadre de cette thèse, une telle entreprise n'était pas envisageable, les solutions élaborées à partir de la structure principale de l'algorithme de Dijkstra ayant demandé à elles seules un investissement très important en temps.

Nous présentons de manière relativement brève les 3 approches principales retenues.

III.1. Assimilation de l'arborescence à un couloir

Chaque arborescence d'évacuation démarrante depuis une case-sortie est assimilée à un couloir, comportant à son extrémité une issue de largeur égale à la taille de la maille. Nous indexons toutes les cases résolues, se rapportant à la sortie examinée, selon le nombre de pas nécessaires pour atteindre la case en question depuis la sortie. Nous comptabilisons également la surface totale du "bassin de drainage" de la sortie et le nombre d'occupants se trouvant dans cette zone. Nous assimilons cette arborescence à un couloir équivalent, la longueur duquel est supposée égale à l'index maximal du bassin, multiplié par la taille de la maille c . La figure suivante illustre ce mode de calcul.



Lors de la construction du chemin d'évacuation, nous venons à examiner si la case A doit être rattachée à la case B. Pour cela, nous allons établir une estimation du temps nécessaire pour évacuer depuis la position A:

- Si la case A n'est pas occupée, nous supposons que l'estimation du temps d'évacuation depuis A est égale au temps d'évacuation depuis la case B, augmenté du temps nécessaire à un occupant fictif pour atteindre B depuis A, avec une vitesse de déplacement correspondant à une densité quasi nulle.
- Si la case A est occupée, nous incrémentons des valeurs adéquates l'occupation, la surface drainée, etc... du bassin de la sortie à laquelle nous nous référons. L'estimée du temps depuis la position A est le temps nécessaire pour évacuer le couloir fictif selon les règles de calcul de Predtechenskii-Milinskii (vitesse, restriction du débit,...). Si toutefois cette valeur est inférieure à celle correspondant au mode de calcul pour une case non occupée, c'est ce dernier mode de calcul qui est retenu.

C'est cette estimée du temps d'évacuation nécessaire qui est utilisée comme critère d'optimisation dans l'algorithme de Dijkstra.

Il est évident que l'introduction de ce critère aura pour premier effet de "raccrocher" certaines cases occupées aux bassins d'évacuation des sorties se situant à la droite de la figure, à cause de la faible estimation du temps nécessaire pour évacuer dont bénéficierons les cases non occupées.

Ce qui est moins évident est que cette procédure aura tendance à réduire les ramifications des arborescences d'évacuation, et diminuer par conséquent la probabilité d'existence d'un point de convergence de nombreuses branches d'évacuation. En effet, si une arborescence d'évacuation connaît de nombreuses ramifications, la surface du bassin de drainage augmente vite par rapport à l'indice maximal du bassin. Le couloir fictif équivalent sera relativement large par rapport à sa longueur, ce qui rapidement aura pour effet un dépassement de la capacité de l'issue finale, dont la largeur reste constante (égale à la taille de la maille). Le retard dû à la formation d'une zone à densité maximale (0.92) selon la méthode russe est important, et l'estimation du temps nécessaire s'en trouvera sensiblement aggravé. La procédure que nous venons de décrire aura par conséquent tendance à favoriser la formation d'arborescences d'évacuation longues et peu ramifiées.

III.2. Estimation par récurrence, à partir du temps nécessaire pour atteindre le noeud-père

Cette deuxième approche s'inscrit dans le même esprit. Nous considérons que l'estimation du temps d'évacuation est égale au temps d'évacuation du noeud-père, augmenté du temps nécessaire pour atteindre cette case, si l'on assimile toutes les cases convergeant au même noeud-père à un couloir de longueur égale à c et de largeur $c \cdot f$, où c est le nombre de noeud-fils f convergeant au même noeud-père. La figure suivante illustre ce principe.

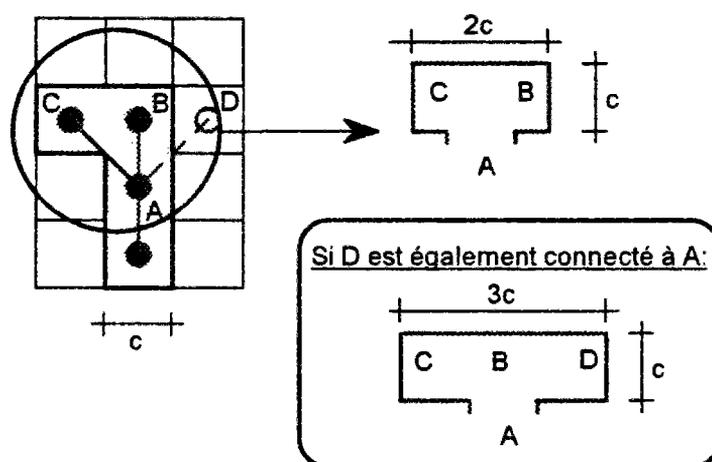


Fig. 100 - Assimilation des noeuds-fils se rattachant au même noeud-père à un couloir de largeur égale au nombre de noeuds-fils multiplié par la largeur de la maille.

Sur le schéma, l'estimation pour B et C sera égale à l'estimation de A, plus le temps nécessaire pour évacuer le couloir fictif représentant les noeuds B et C, selon la méthode de calcul de Predtechenskii. Plus une case possédera de noeuds-fils, plus le "couloir" se déversant dans cette case sera large, avec comme conséquence un dépassement plus probable de la capacité de l'issue, et les retards que celui-ci entraîne. L'algorithme aura donc tendance à éviter que de nombreuses cases viennent se "greffer" sur le même noeud-père.

Il est possible d'imaginer deux manières de concevoir cet algorithme. Supposons que, lors d'un pas ultérieur, D soit également rattaché à A. Le temps d'évacuation du couloir (CBD) va être modifié. On peut choisir de modifier ou non rétroactivement les estimations des cases B et C. Or, outre la solution définitive pour chaque case, la procédure de Dijkstra conserve en permanence une solution optimale provisoire. Par conséquent, le choix de la modification rétroactive des estimations des cases B et C

entraînera une série de calculs rectificatifs pour retrouver une solution optimale temporaire pour les cases qui étaient provisoirement connectées à B et C.

III.3. Utilisation d'un critère quadratique

Cette méthode est dérivée de la précédente: au lieu d'utiliser un temps d'évacuation découlant de calculs selon la méthode de Predtechenskii, nous utilisons un simple critère quadratique en fonction du nombre d'occupants rattachés à un seul noeud-père. Si, par exemple, D est connecté sur le schéma précédent à A, l'estimation de D est égale à celle de A augmentée de:

$$\left(\max\left\{1, \sum(\text{occupants des cases } B, C \text{ et } D)\right\}\right)^2$$

Il est encore une fois possible de répercuter la nouvelle estimation pour les cases B et C.

III.4. Récapitulatif

Dans la pratique, le choix de la méthode de génération des chemins optimaux est déclaré à l'aide d'un numéro d'option pour l'algorithme de Dijkstra. Le tableau suivant présente de manière récapitulative les choix possibles. Les numéros d'option manquants correspondent à des solutions explorées pendant la phase de développement, mais qui ont été abandonnées par la suite. (Nous n'avons pas procédé à la renumérotation des options.)

No. option Dijkstra	Description
0	Optimisation selon la distance minimale
2	Assimilation de l'arborescence depuis chaque sortie à un couloir. Calcul du temps d'évacuation du couloir selon Predtechenskii.
5	Assimilation des cases convergeant vers un seul noeud-père à un couloir se déversant sur cette case. Calcul du temps d'évacuation du couloir selon Predtechenskii. Répercussion du résultat sur les cases ayant le même noeud-père.
6	Idem, sauf que le résultat n'est pas répercuté.
7	Utilisation d'un critère quadratique sur le nombre total d'occupant rattachés à un même noeud-père. Répercussion du résultat sur toutes les cases ayant le même noeud-père.
8	Idem, sauf que le résultat n'est pas répercuté.

Les deux versions de l'algorithme de Dijkstra que nous avons principalement utilisées sont la version 2 et la version 5.

Dans tous les cas d'optimisation avec recours à un critère d'estimation du temps, la distance est retenue comme critère secondaire d'optimisation, et le nombre de virages comme troisième critère.

Une modification est également nécessaire dans la procédure de détermination du but du déplacement (voir chapitre 5): continuer à viser le point le plus éloigné de l'arborescence d'évacuation risque d'annuler les contournements d'occupants obtenus grâce à la procédure d'optimisation selon un critère de temps.

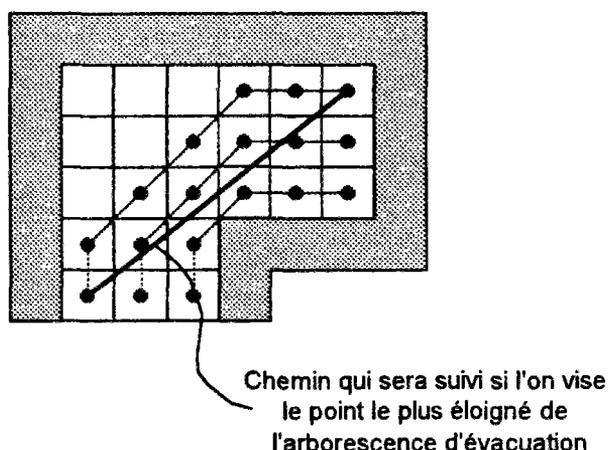


Fig. 101 - Risque d'annulation des avantages du chemin optimisé sur le temps, si l'on vise la case la plus éloignée de l'arborescence.

C'est pour cela que, dans le cas d'utilisation de chemins d'évacuation optimisés sur le temps, nous introduisons un critère de visibilité lié à la densité d'occupation: au-delà de 3m depuis la position initiale, une densité d'occupation supérieure à 0.5 (au sens de la méthode russe) constitue une cause de perte de la visibilité.

IV. PRESENTATION D'EXEMPLES

Les exemples que nous présentons dans la dernière partie de ce chapitre ont été générés à l'aide du modèle final, c'est à dire avec prise en compte des contraintes physiques découlant du fait que les occupants ne sont pas ponctuels. Cette partie du modèle est décrite au chapitre suivant. A ce stade de développement du modèle, la présentation de résultats sans prise en compte de la densité maximale d'occupation n'aurait pas de sens.

IV.1. Etude de l'évacuation d'une grande salle sans obstacles internes

Soit la salle présentée à la figure suivante, initialement uniformément occupée (1 p/m^2). La petite dimension interne est 12m et la grande 22m. L'issue est large de 4m.

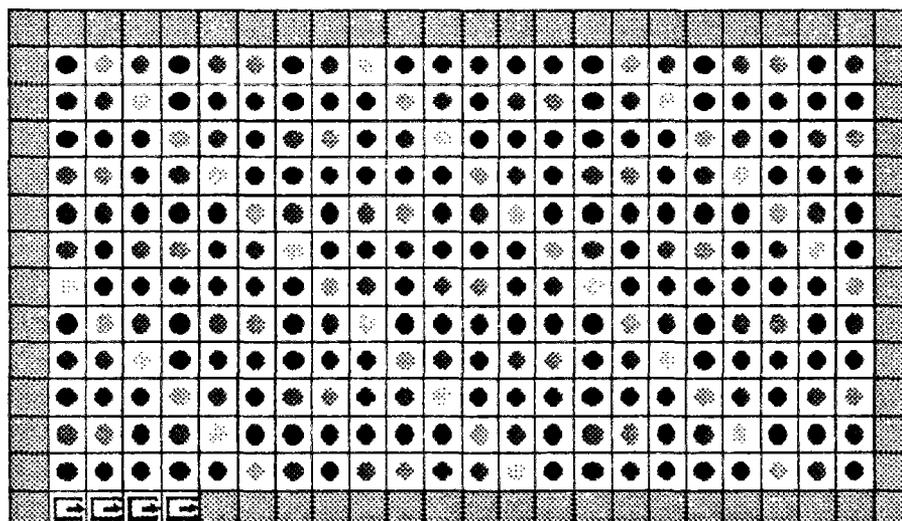
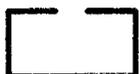
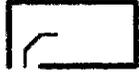


Fig. 102 - Forme générale et occupation initiale de la grande salle sans obstacles.

Nous allons présenter des résultats de simulation obtenus avec les diverses versions de l'algorithme de Dijkstra, et en faisant varier la position de l'issue à l'intérieur de la salle. La largeur de la maille est 1m et le pas de temps 1 seconde.

Le tableau suivant nous renseigne sur les configurations retenues.

No. de configuration	Position de l'issue
1	
2	
3	
4	

IV.1.1. Configuration 1

Nous présentons en premier lieu les résultats pour la première configuration, qui est susceptible de fournir les résultats les plus cohérents en raison de sa forme longitudinale, qui peut être apparentée à un couloir. Dans la légende de chaque figure nous indiquons le pourcentage d'utilisation des cases-issues, celles-ci étant numérotées de gauche à droite, et du bas vers le haut.

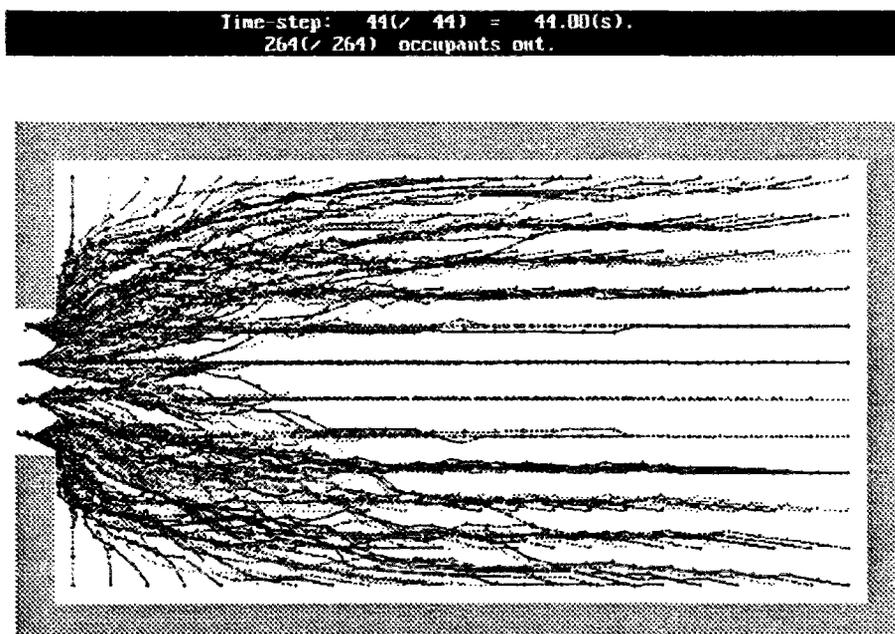


Fig. 103 - Version 0 (optimisation sur la distance):44s.

Issues: 34%-16%-16%-34%

Time step: 44(/ 44) = 44.00(s).
264(/ 264) occupants out.

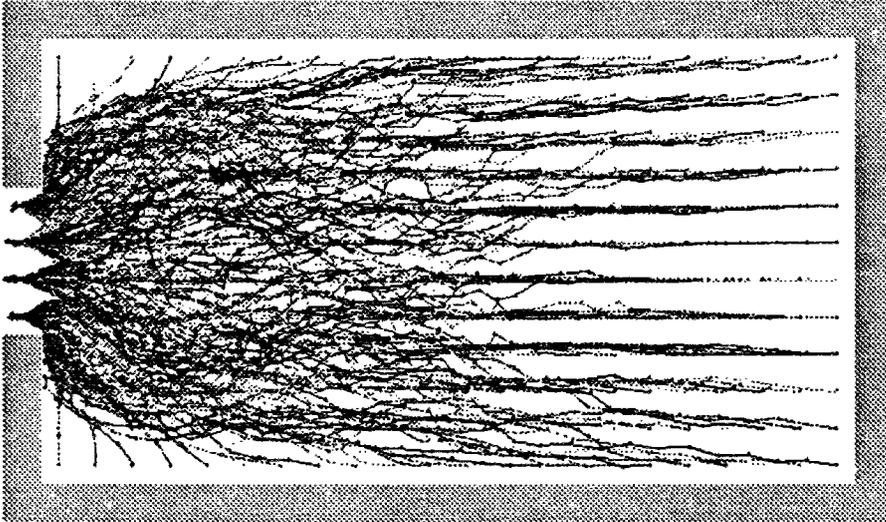


Fig. 104 - Version 2: 44s. Issues: 31%-19%-20%-30%

Time step: 40(/ 40) = 40.00(s).
264(/ 264) occupants out.

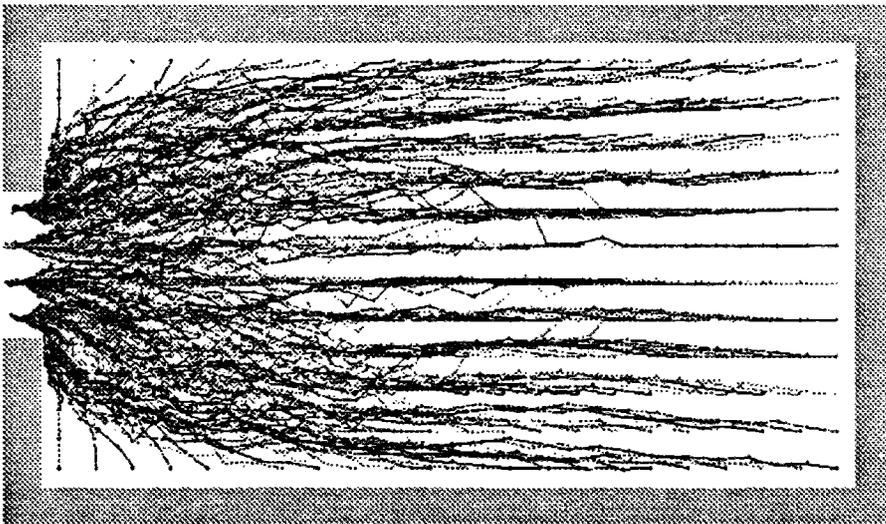


Fig. 105 - Version 5: 40s. Issues: 28%-22%-21%-29%

Nous remarquons sur ces 3 premiers exemples que l'optimisation avec un critère de temps ne modifie pas sensiblement le temps total d'évacuation. Ce résultat semble logique compte tenu de la configuration du site. Il est cependant à noter que, dans les trois cas présentés, l'usage des issues révèle un déséquilibre non négligeable, plus accentué dans le cas de l'optimisation avec un critère de distance.

IV.1.2. Configuration 2

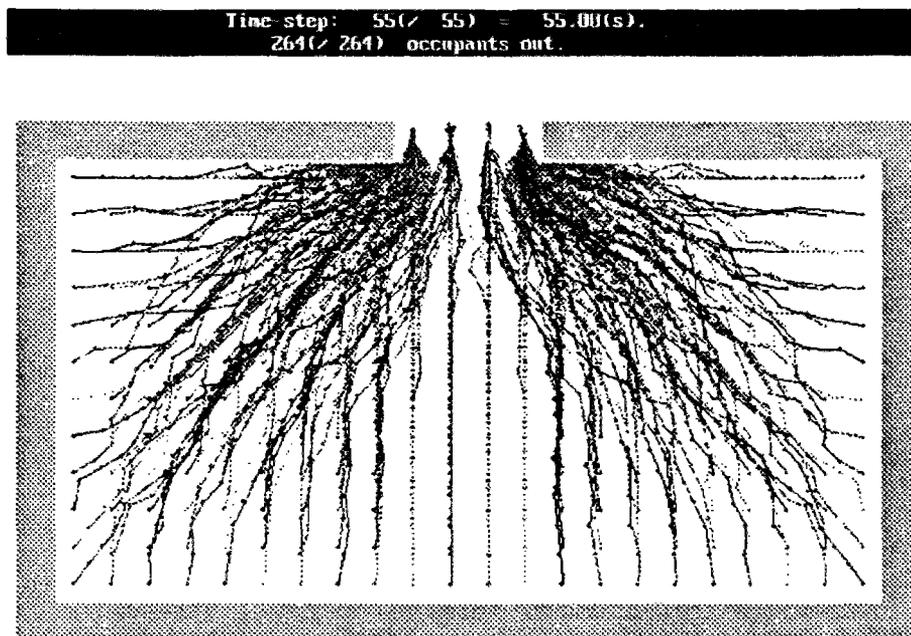


Fig. 106 - Version 0: 55s. Issues: 41%-9%-9%-41%

Nous remarquons tout de suite les problèmes que pose sur cette configuration l'optimisation selon un critère de distance: le temps d'évacuation augmente sensiblement, et le déséquilibre dans l'usage des issues s'aggrave.

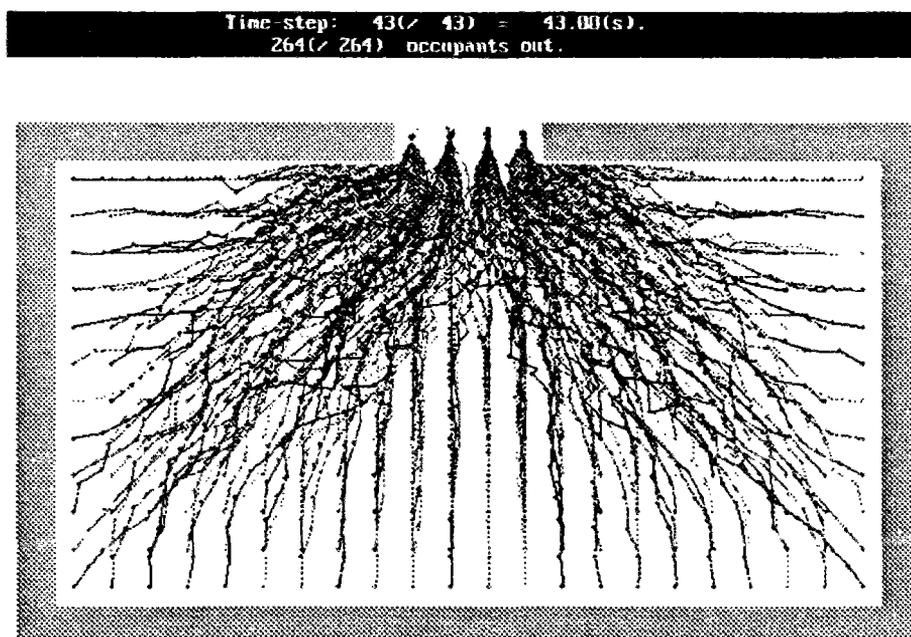


Fig. 107 - Version 2: 43s. Issues: 30%-20%-19%-31%

Time-step: 43(/ 43) = 43.00(s).
264(/ 264) occupants out.

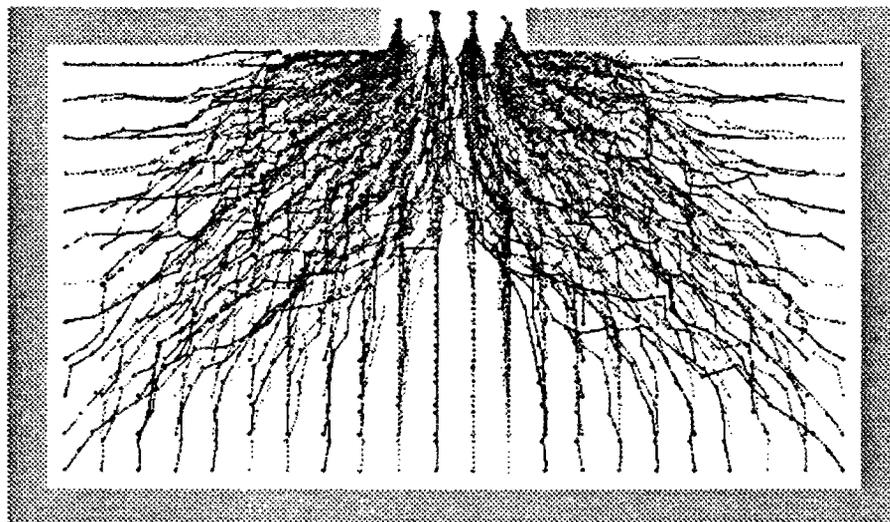


Fig. 108 - Version 5: 43s. Issues: 33%-18%-17%-32%

Nous remarquons par contre que l'usage des versions 2 et 5 de l'algorithme de Dijkstra permettent de "corriger" ce problème (dans la mesure où l'on considère qu'il s'agit effectivement d'un problème), et d'obtenir un temps d'évacuation sensiblement égal à celui de la première configuration. La question qui surgit de manière évidente est que se passerait-il dans la réalité? Nous ne possédons pas pour l'instant d'éléments fiables de réponse. Notre avis purement intuitif, en comparant les configurations 1 et 2 est que, étant donnée que l'issue est placée dans le cas de la configuration 2 au centre de la salle, du côté de la grande dimension et que la distance moyenne des occupants à la sortie est plus faible, le temps d'évacuation ne doit pas être sensiblement supérieur.

IV.1.3. Configurations 3 et 4

Nous allons à présent examiner les résultats obtenus si nous déplaçons la sortie vers un angle de la salle.

Time-step: 101(/ 101) = 101.00(s).
264(/ 264) occupants out.

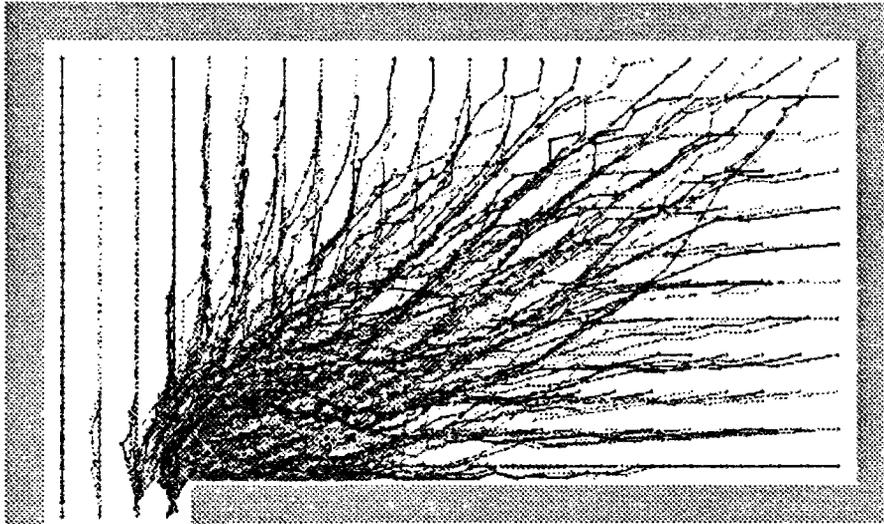


Fig. 109 - Version 0: 101s. Issues: 5%-5%-11%-79%

Time-step: 30(/ 101) = 30.00(s).
112(/ 264) occupants out.

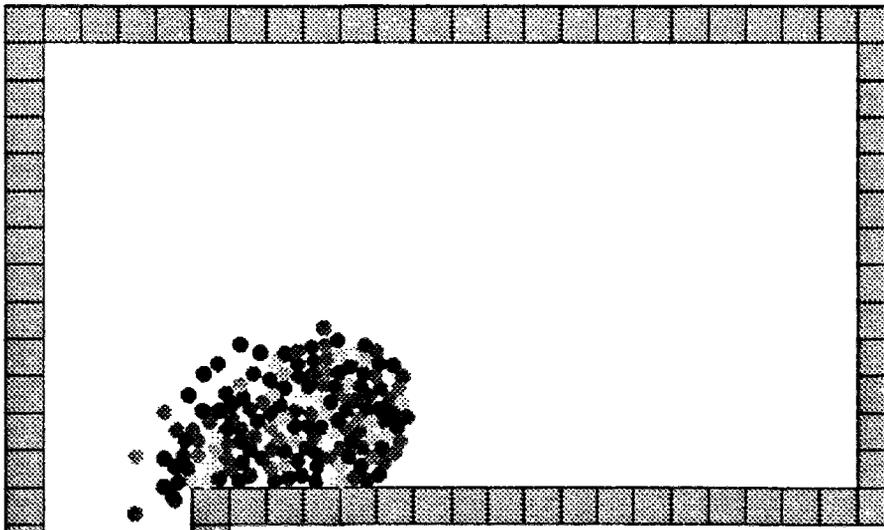


Fig. 110 - Version 0: 101s. Situation à t=30s.

Nous constatons sur les deux figures précédentes que l'algorithme en distance minimale provoque un bouchon très important: le temps d'évacuation est multiplié par deux par rapport aux configurations 1 et 2. Ce phénomène est simplement dû à la

convergence des chemins d'évacuation. La configuration 4 nous permet de confirmer cette hypothèse.

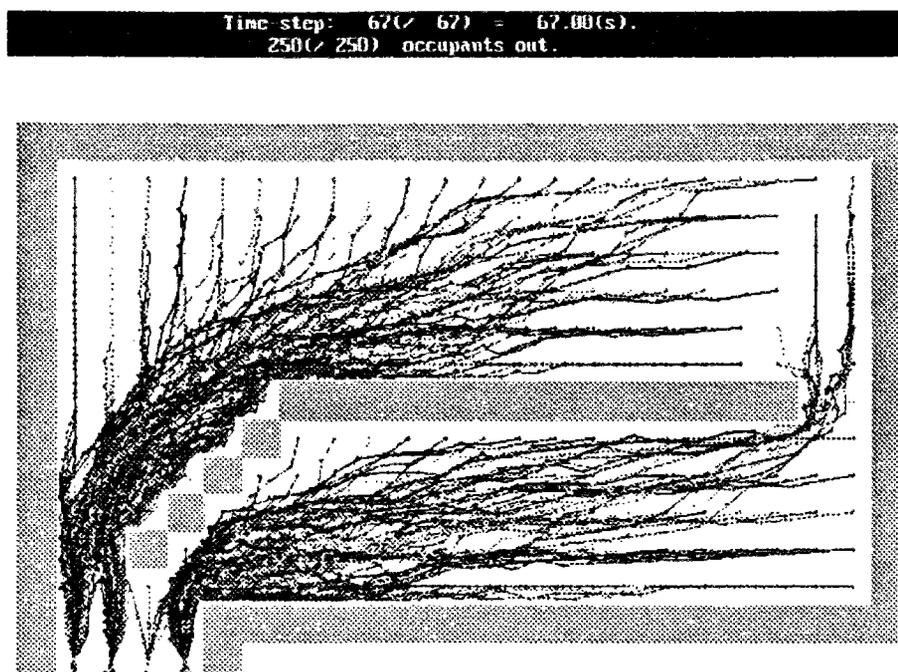


Fig. 111 - Version 0: 67s. Issues: 25%-31%-4%-40%

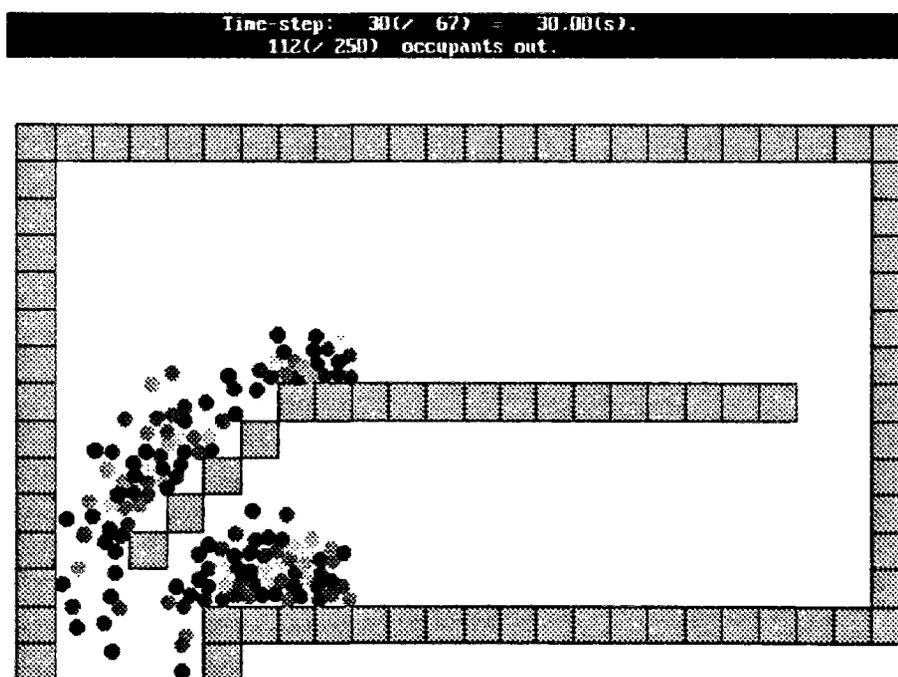


Fig. 112 - Version 0: 67s. Situation à t=30s.

L'introduction d'une séparation forcée des flux d'évacuation entraîne une nette diminution du temps d'évacuation. Il est intéressant de mentionner que l'usage

d'algorithmes basés sur la minimisation d'un critère de temps n'apporte pas d'amélioration du temps d'évacuation pour cette configuration.

Revenons à la configuration 3. Nous présentons une suite de figures détaillées provenant de simulations correspondant à cette configuration.

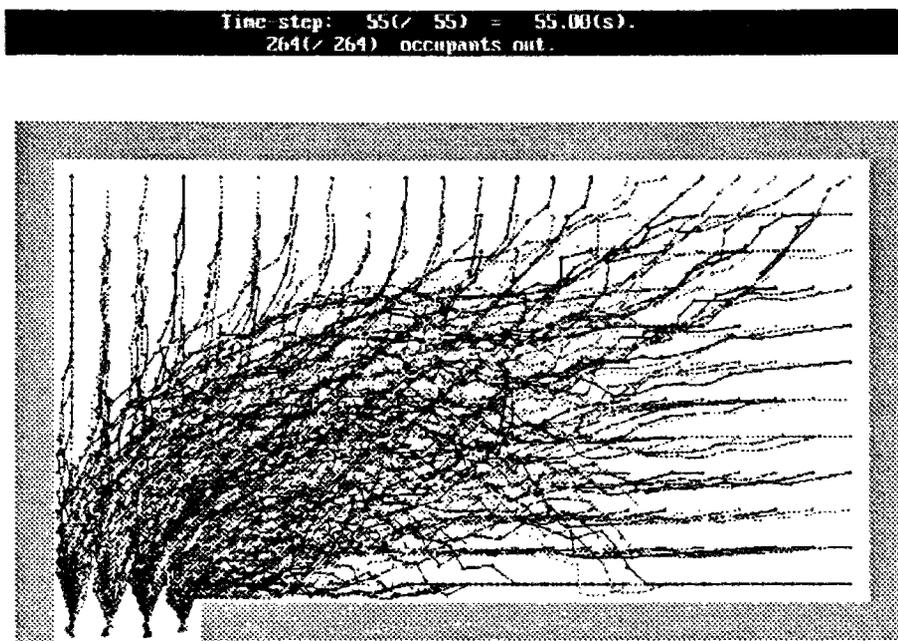


Fig. 113 - Version 2: 55s. Issues: 15%-20%-23%-43%

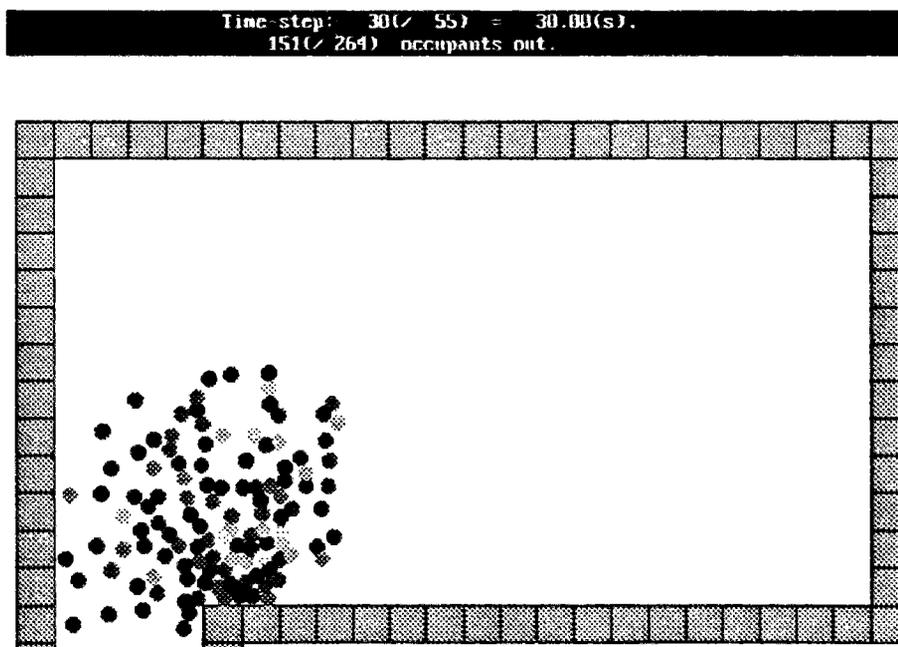


Fig. 114 - Version 2: 55s. Situation à t=30s.

Time step: 41(/ 55) = 41.00(s).
 Occ. No. 22 - 200(/ 264) occupants out.

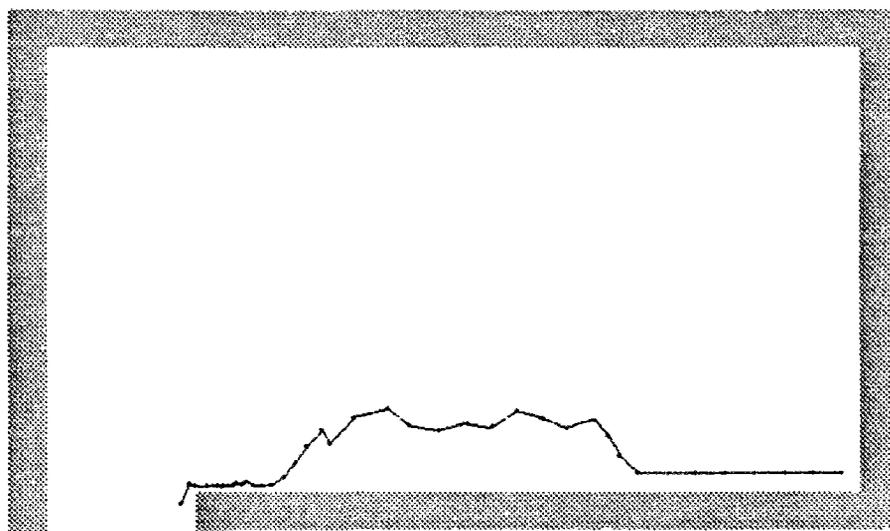


Fig. 115 - Version 2: 55s. Cheminement de l'occupant 22.

Time step: 39(/ 55) = 39.00(s).
 Occ. No. 264 - 199(/ 264) occupants out.

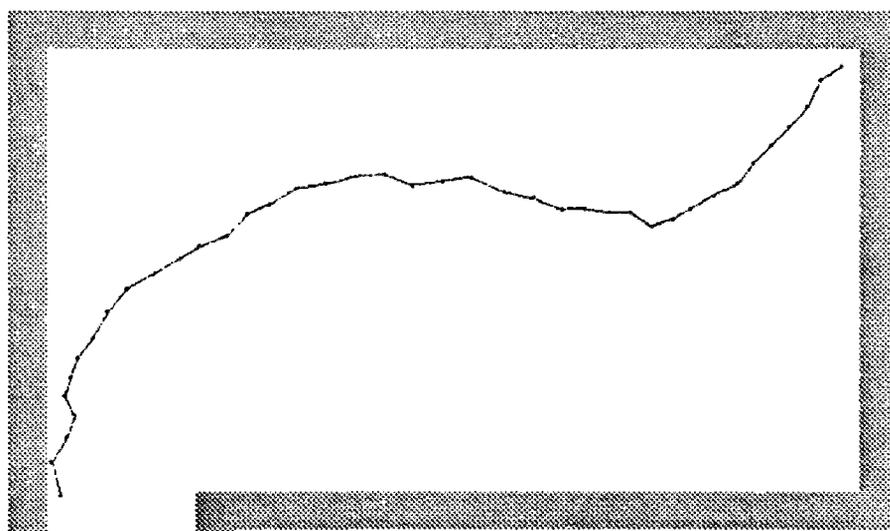


Fig. 116 - Version 2: 55s. Cheminement de l'occupant 264.

Nous constatons que le temps d'évacuation a été réduit de moitié, et que la répartition aux issues est beaucoup plus régulière. Des résultats analogues ont été obtenus à l'aide des versions 5 et 7 de l'algorithme de Dijkstra.

Time step: 58(/ 58) = 58.00(s).
264(/ 264) occupants out.

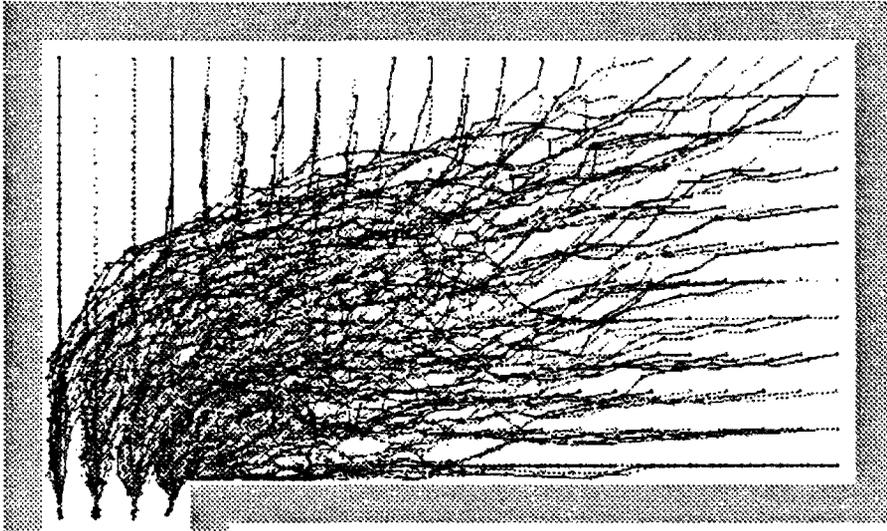


Fig. 117 - Version 5: 58s. Issues: 13%-17%-23%-47%

Time step: 30(/ 58) = 30.00(s).
147(/ 264) occupants out.

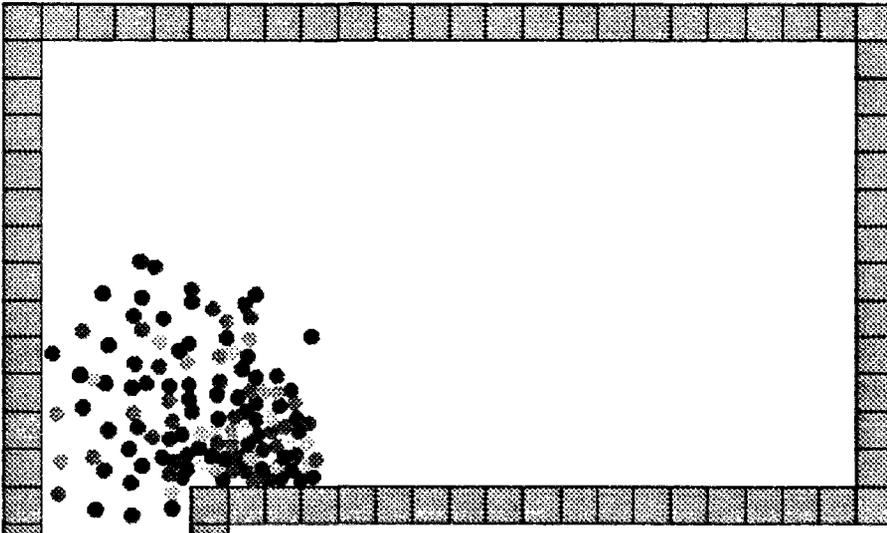


Fig. 118 - Version 5: 58s. Situation à t=30s.

Time-step: 51(/ 58) = 51.00(s).
Occ. No. 22 - 249(/ 264) occupants out.

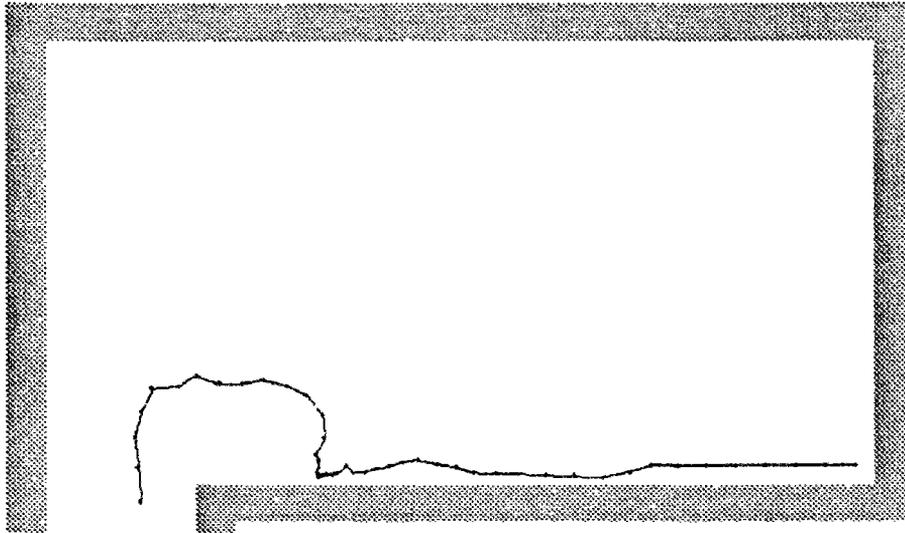


Fig. 119 - Version 5: 58s. Cheminement de l'occupant 22.

Time step: 43(/ 58) = 43.00(s).
Occ. No. 264 - 218(/ 264) occupants out.

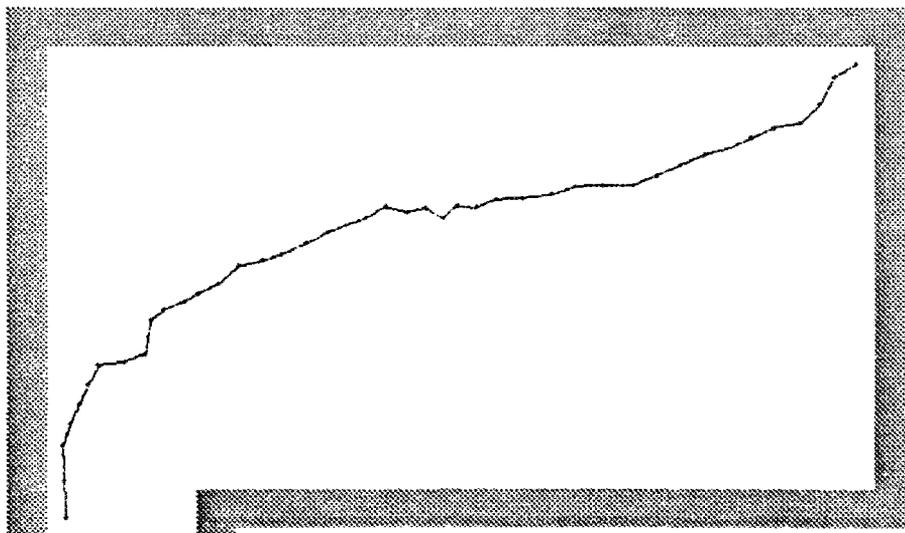


Fig. 120 - Version 5: 58s. Cheminement de l'occupant 264.

Time-step: 53(/ 53) = 53.00(s).
264(/ 264) occupants out.

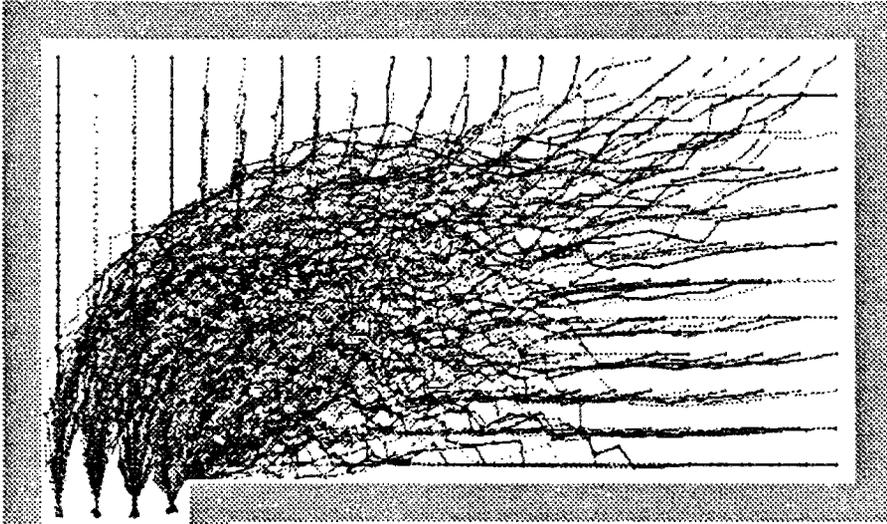


Fig. 121 - Version 7: 53s. Issues: 14%-20%-22%-44%

Time-step: 30(/ 53) = 30.00(s).
145(/ 264) occupants out.

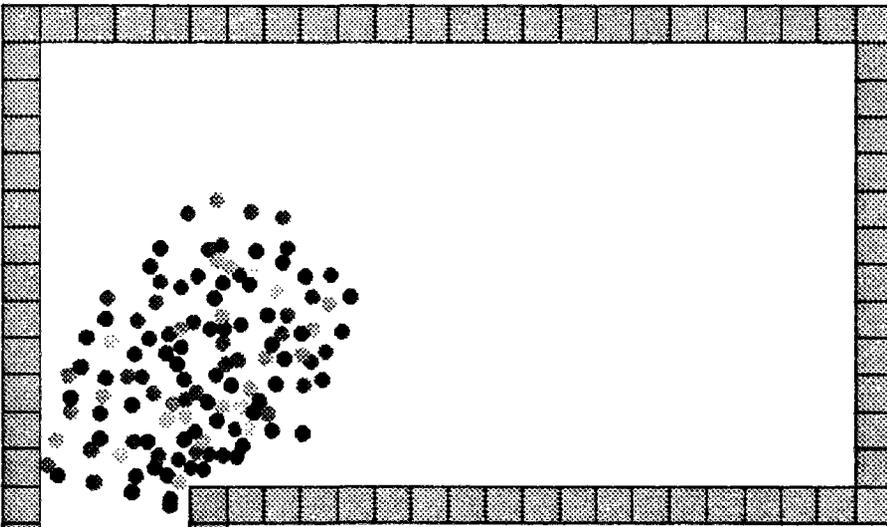


Fig. 122 - Version 7: 53s. Situation à t=30s.

Time-step: 40(/ 53) = 40.00(s).
Occ. No. 22 - 196(/ 264) occupants out.

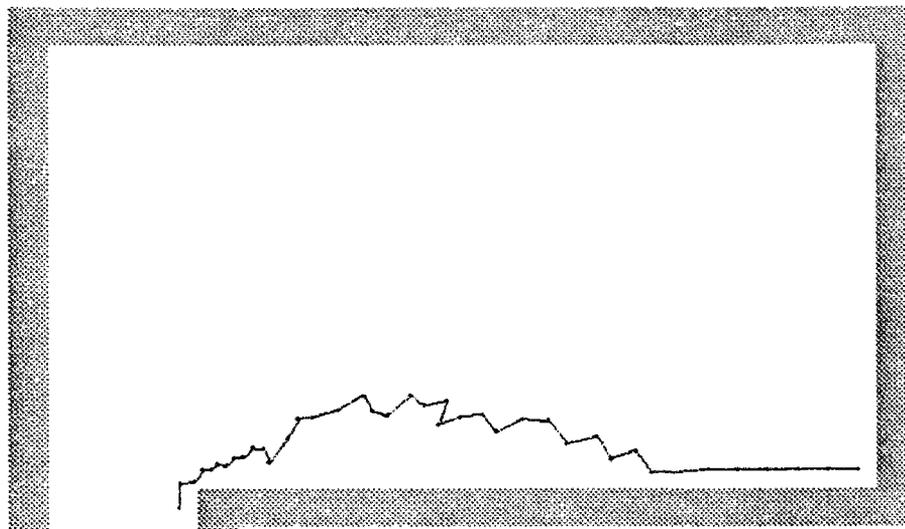


Fig. 123 - Version 7: 53s. Cheminement de l'occupant 22.

Time-step: 42(/ 53) = 42.00(s).
Occ. No. 264 - 207(/ 264) occupants out.

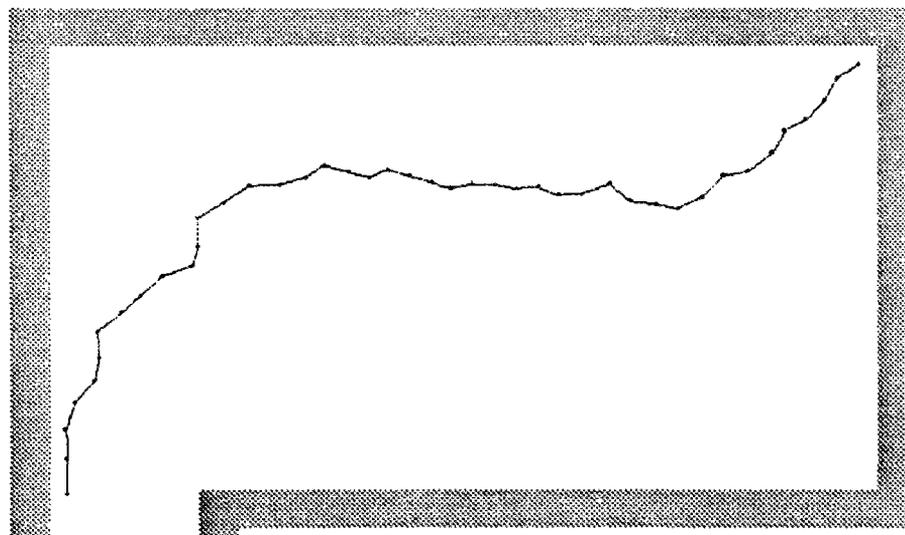
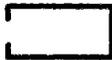
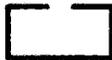
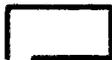
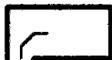


Fig. 124 - Version 7: 53s. Cheminement de l'occupant 264.

IV.1.4. Tableau récapitulatif

Le tableau suivant nous présente les temps d'évacuation selon la configuration du site et la version de l'algorithme de recherche des chemins optimaux utilisé.

		Version de l'algorithme de Dijkstra		
Configuration		0	2	5
1		44s	44s	40s
2		55s	43s	43s
3		101s	55s	58s
4		67s	68s	62s

IV.2. Configuration "Piège"

Nous présentons à présent les résultats obtenus pour la configuration-test de la figure suivante. La taille de la maille est toujours de 1m et le pas de temps de 1s.

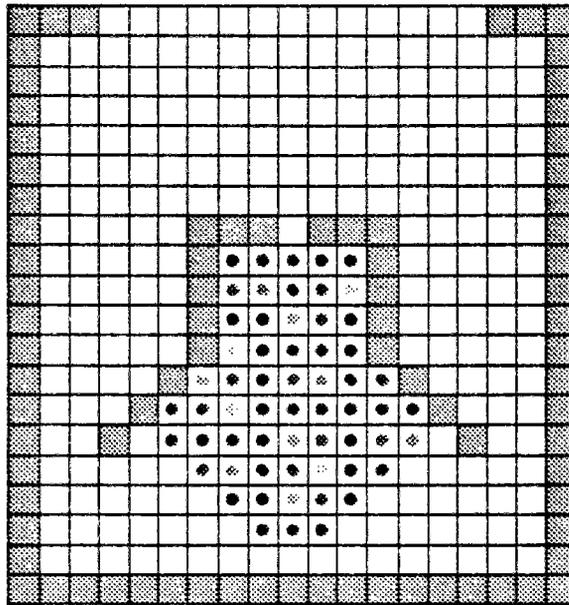


Fig. 125 - Situation initiale

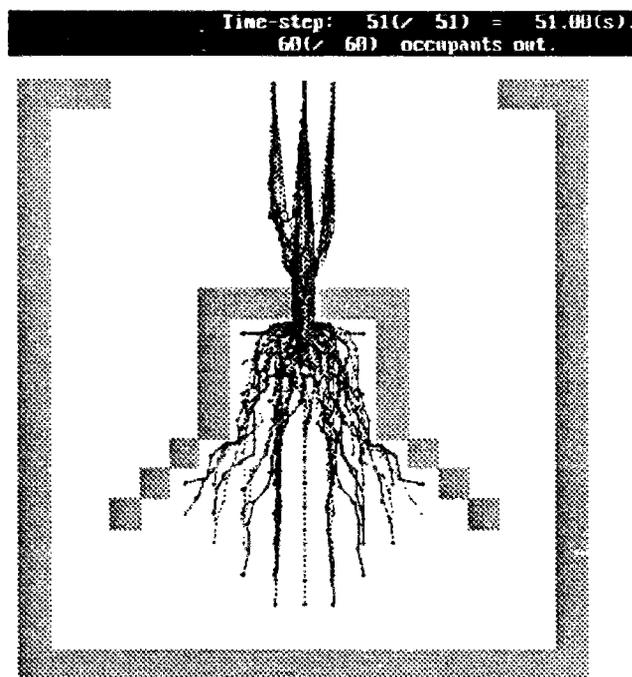


Fig. 126 - Version 0 (51s).

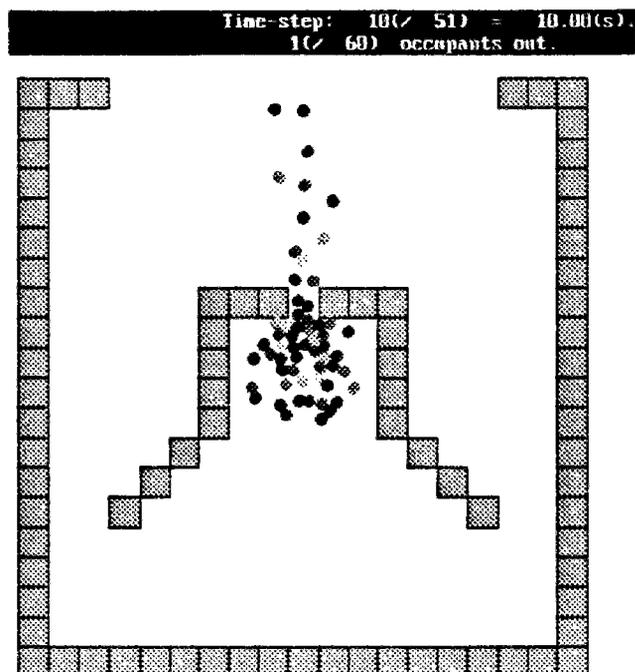


Fig. 127 - Version 0 - Situation à t=10s.

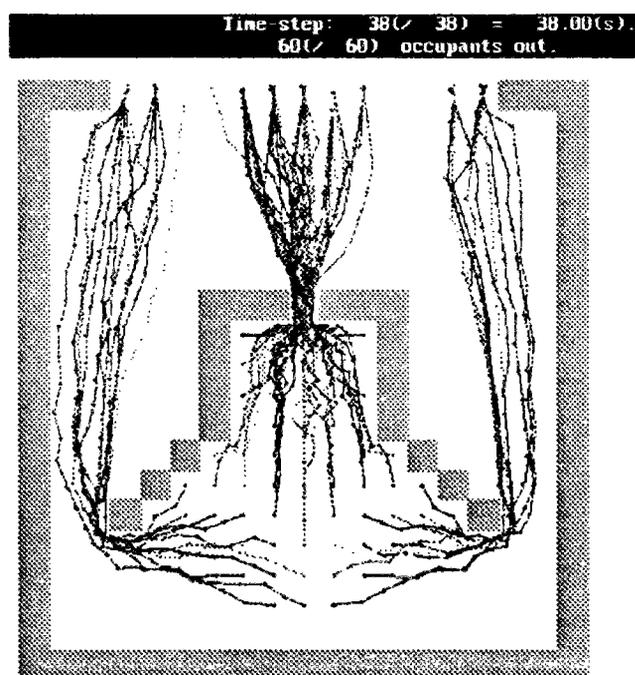


Fig. 128 - Version 2 (38s).

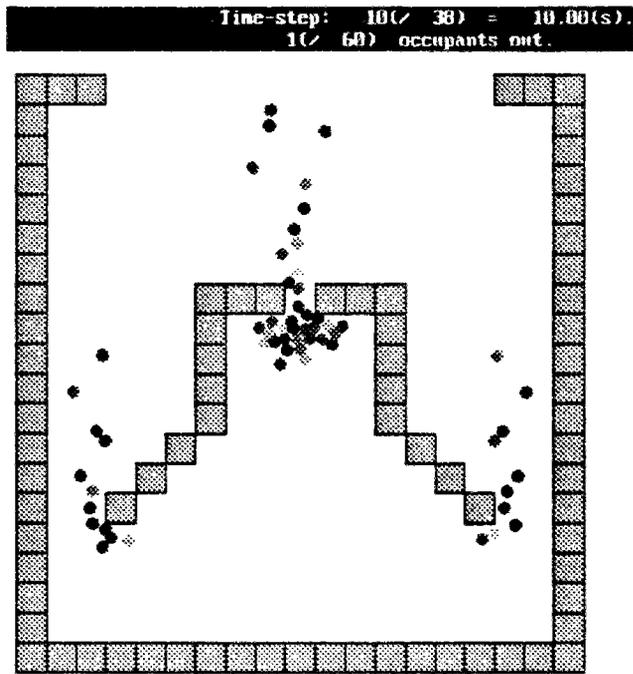


Fig. 129 - Version 2 - Situation à t=10s.

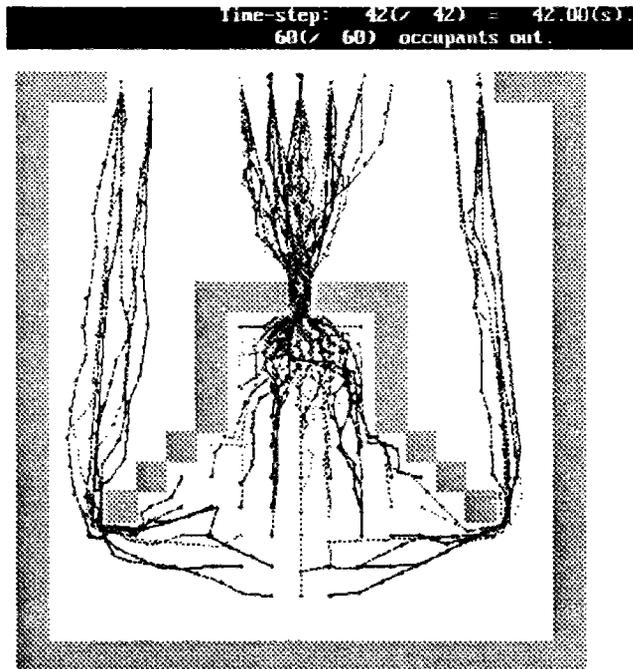


Fig. 130 - Version 5 (42s).

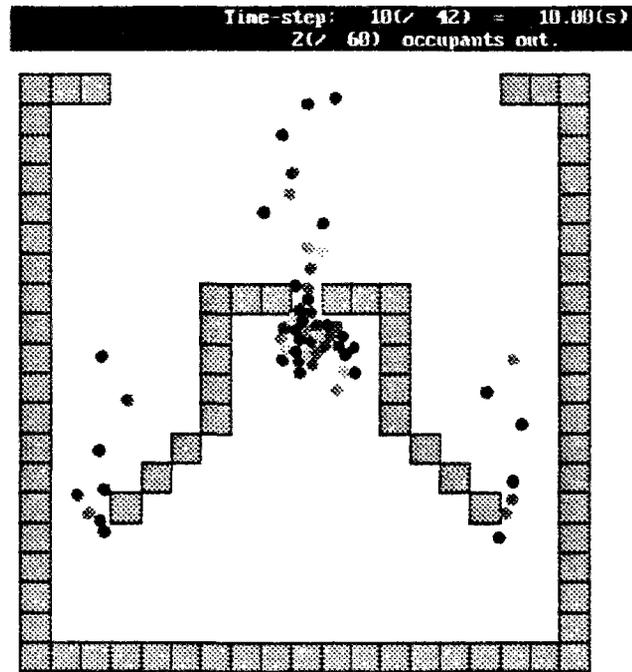


Fig. 131 - Version 5 - Situation à t=10s.

IV.3. Configuration avec issues et occupation disproportionnées.

Il s'agit d'une configuration que nous avons déjà présentée à plusieurs reprises.

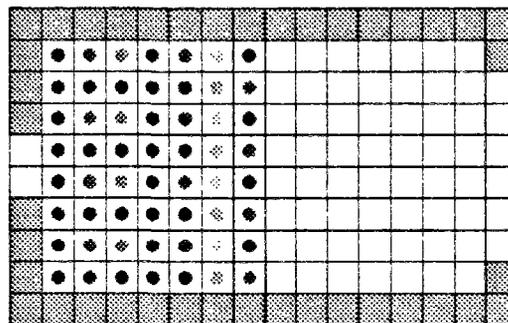


Fig. 132 - Situation initiale.

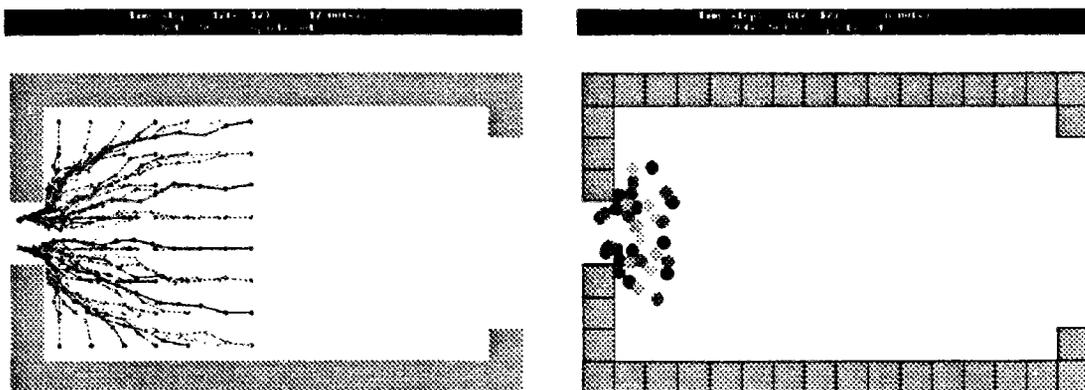


Fig. 133 - Version 0 (17s) - Cheminements et situation à t=8s.

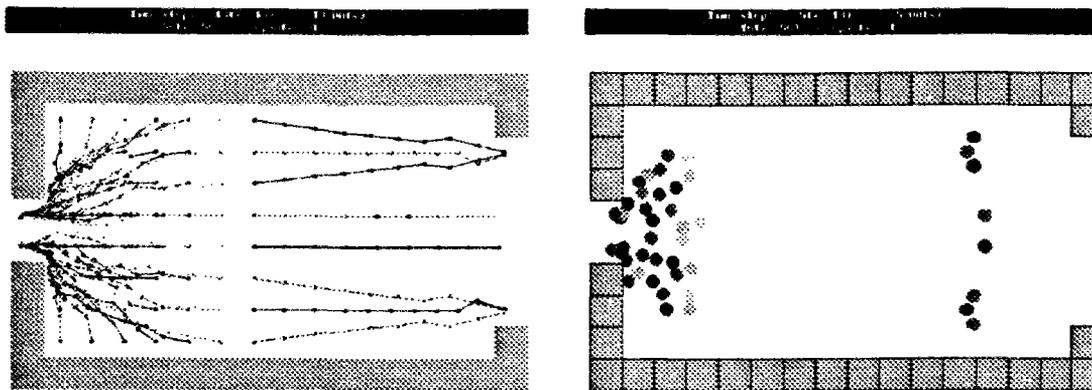


Fig. 134 - Version 2 (13s) - Cheminements et situation à t=5s.

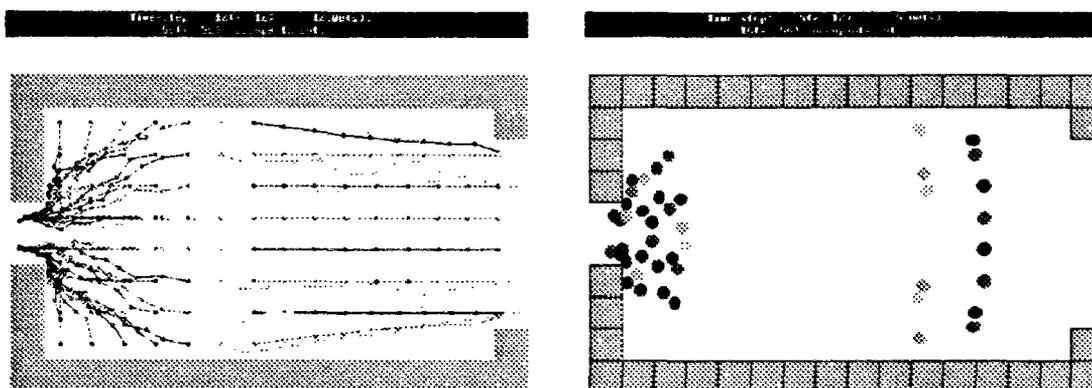


Fig. 135 - Version 5 (12s) - Cheminements et situation à t=5s.

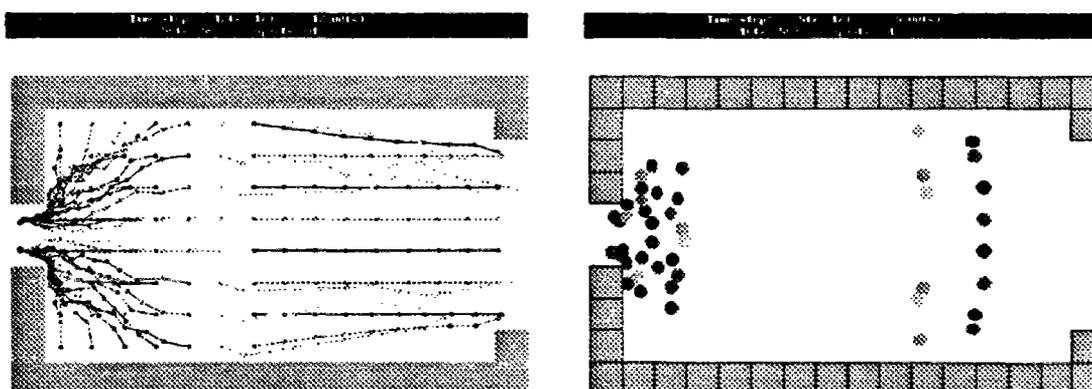


Fig. 136 - Version 6 (12s) - Cheminements et situation à t=5s.

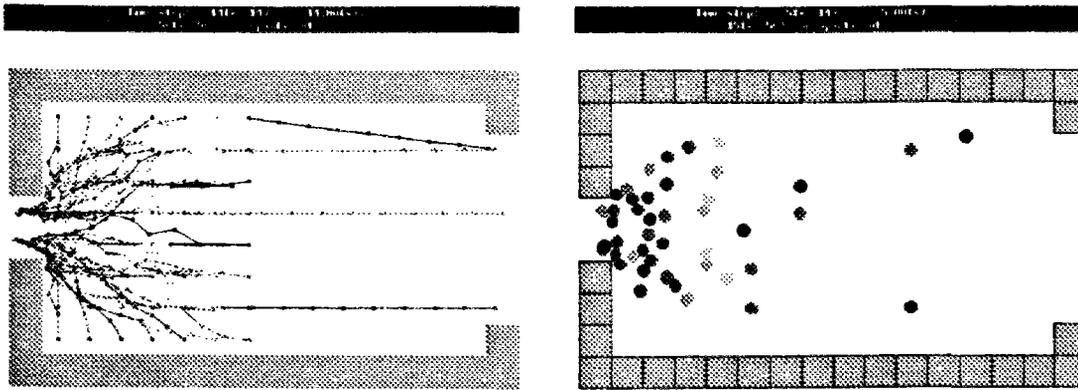


Fig. 137 - Version 7 (14s) - Cheminements et situation à $t=5s$.

Ce dernier exemple illustre les instabilités générés par cette version de l'algorithme de Dijkstra. L'algorithme est très sensible aux positions des occupants, et les solutions de chemins optimaux d'un pas de temps à l'autre sont souvent très différentes, provoquant par la suite des oscillations dans le mouvement des occupants...

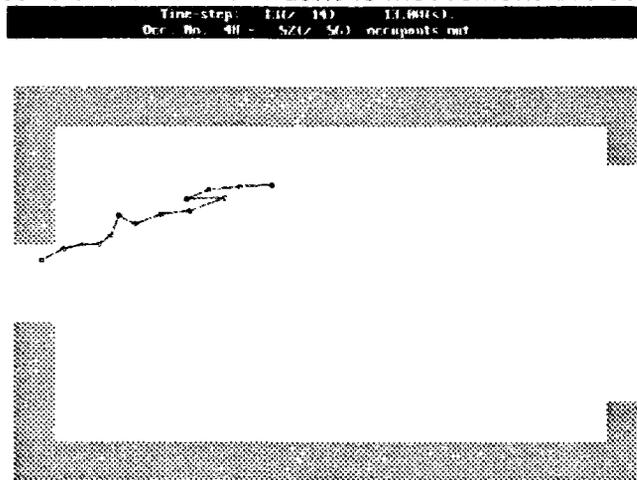


Fig. 138 - Exemple d'oscillation "numérique" dans le déplacement des occupants

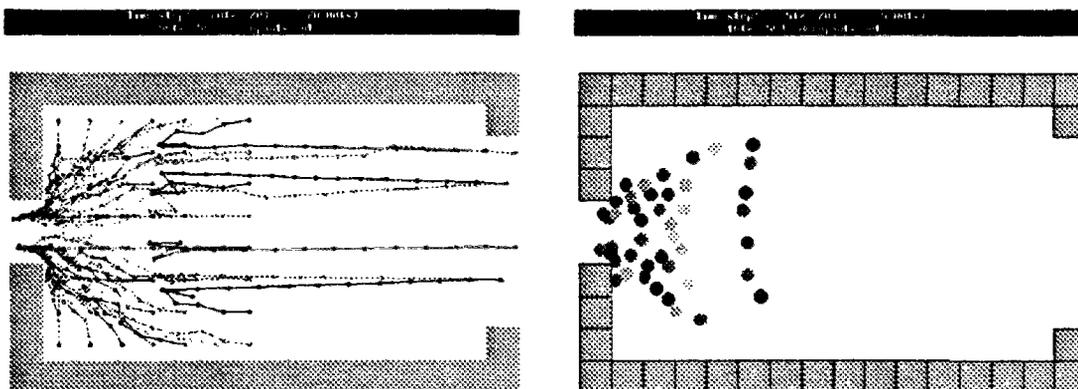


Fig. 139 - Version 8 (18s) - Cheminements et situation à $t=5s$.

Sur cet exemple, nous remarquons que ce n'est qu'à la cinquième seconde que quelques occupants commencent à se diriger vers la droite. Nous rappelons que la version 8 de l'algorithme n'est en fait qu'une variante de la version 7.

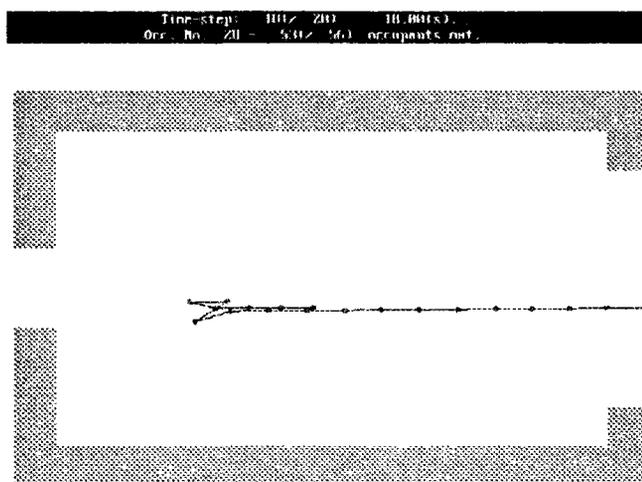


Fig. 140 - Exemple d'oscillation "numérique" dans le déplacement des occupants

Il est enfin à noter que pour les versions 5 et 6 l'évacuation des occupants quittant la salle par la droite prend fin au même instant que celle des individus évacuant par les cases-sorties à gauche.

V. CONCLUSION

Nous avons montré dans ce chapitre qu'il était possible de mettre au point des techniques permettant d'atténuer les problèmes d'entassement des occupants découlant de l'usage conjoint d'une représentation fine en deux dimensions, et d'un algorithme privilégiant le déplacement dans le sens de la distance la plus courte. La question à laquelle il est malheureusement difficile de formuler une réponse est celle du "degré" de pertinence des déplacements obtenus?

Dans l'exemple de la salle pour laquelle nous déplaçons l'issue, il semble par exemple intuitivement logique de supposer que le déplacement de l'issue depuis le petit côté de la salle vers un coin de celle-ci va gêner le mouvement des évacuants; mais jusqu'à quel "degré"? Les mêmes questions apparaissent pour le déplacement éventuel vers des sortie plus larges mais plus éloignées.

Il n'existe malheureusement aucune donnée bibliographique sur le sujet; seules des expérimentations spécifiques permettraient de jeter une certaine lumière sur ces aspects du mouvement de foule.

C H A P I T R E 8 :

R E S P E C T D E L A D E N S I T E

I. INTRODUCTION

A ce stade de développement du modèle, la seule lacune apparemment importante concerne l'absence de prise en compte des contraintes découlant des dimensions physiques des occupants: nous avons jusqu'à présent autorisé un agencement quelconque des occupants, sans nous soucier du fait que chaque individu occupe un certain espace¹⁵⁴. La non prise en compte de ces contraintes conduit, entre autres, à des résultats aberrants: la densité peut accroître rapidement et atteindre des valeurs très élevées, provoquant une telle chute de la vitesse que l'évacuation peut être bloquée.

De ce point de vue, les travaux des russes Predtechenskii et Milinskii constituent une base de développement idéale, puisqu'ils sont les seuls à avoir relié la densité d'occupation et les dimensions physiques des individus.

Les Russes assimilent la projection au sol d'un individu à une ellipse (Fig. 141) et proposent des combinaisons de longueur des axes a et c en fonction de l'âge, des vêtements,...

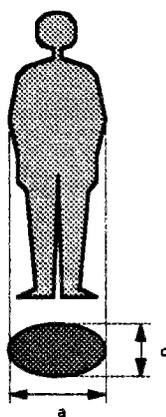


Fig. 141 - Approximation de la surface projetée d'un individu par une ellipse.

¹⁵⁴ Rappelons cependant que les exemples présentés à la fin du chapitre précédent proviennent du modèle final avec prise en compte d'une densité maximale à ne pas dépasser.

L'ellipse est une forme géométrique "anisotrope", dont l'orientation doit être prise en compte si l'on veut l'utiliser pour représenter un individu. D'autre part, la manipulation numérique de l'ellipse pose de nombreux problèmes. C'est pour ces raisons que, dans le modèle que nous proposons, nous avons abandonné l'approche de l'ellipse et opté pour une représentation des occupants à l'aide d'un disque.

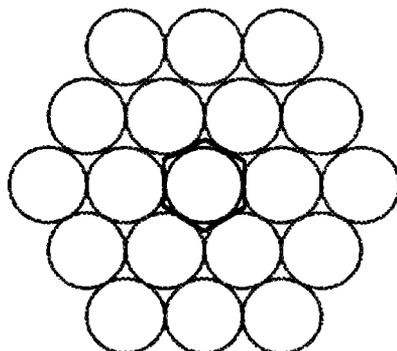


Fig. 142 - Hypothèse de disposition hexagonale des occupants pour le calcul de la densité maximale

Pour calculer la densité maximale découlant d'une représentation des individus à l'aide d'un disque, supposons une disposition hexagonale des occupants. Soit r le rayon du disque, l'aire de l'hexagone circonscrit est la suivante:

$$S = r^2 2\sqrt{3}$$

La densité maximale correspondant au modèle hexagonal d'occupation est donc le rapport (Aire du disque/Aire de l'hexagone):

$$D_{max} = \frac{\pi r^2}{r^2 2\sqrt{3}} \approx 0.91$$

Nous constatons que nous retrouvons une limite supérieure de la densité très proche de celle utilisée dans la méthode russe (0,92). La densité ne dépassera cette limite que dans la mesure où les disques se "compriment", de sorte que la taille des interstices diminue.

Représenter correctement les contraintes physiques liées aux dimensions des occupants dans le modèle que nous proposons nécessite les deux éléments suivants:

1. Choisir le rayon du disque en conformité avec l'hypothèse de surface au sol d'un individu retenue. Pour notre part, nous avons toujours supposé que la projection au sol d'un individu est de 0.125 m², ce qui correspond selon

Predtechenskii et al au cas de l'homme adulte en vêtements d'hiver. Conformément à cette hypothèse, le diamètre du disque représentant un occupant est de 40 cm.

2. S'assurer lors du déplacement des occupants que deux disques n'empiètent pas l'un sur l'autre.

Indiquons d'ores et déjà que cette exigence s'est finalement révélée difficile à satisfaire.

II. ENONCE DU PROBLEME

Rappelons qu'à chaque pas de temps et pour chaque occupant nous devons déterminer le pas optimal, c'est à dire le point de la zone accessible le plus proche du but (cf. Chapitre 6).

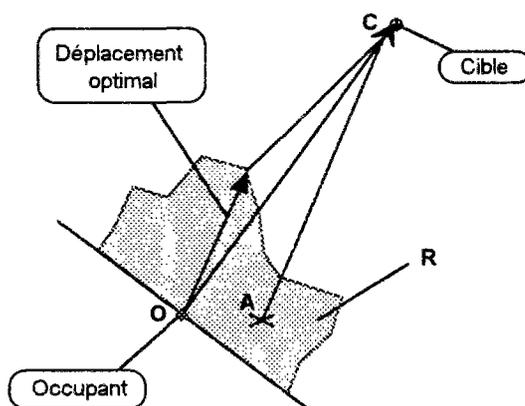


Fig. 143 - Recherche du pas rapprochant le plus du but.

Soient (x_A, y_A) et (x_C, y_C) les coordonnées respectives de A et C , nous cherchions jusqu'à présent:

$$\min_{A \in R} dist(A)$$

avec:

$$dist(A) = (x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2$$

Nous avons autant de problèmes indépendants de recherche de minimum que d'occupants à déplacer. La solution s'exprime concrètement par le couple (α, f) , représentant l'angle de déviation par rapport à la ligne droite, et la fraction du pas retenu par rapport au pas maximal réalisable dans la direction donnée.

Il s'agit à présent d'introduire la contrainte de non-superposition des disques, qui peut également être formulée sous la forme d'une distance minimale à ne pas dépasser entre les "centres" de 2 occupants. Cette distance est bien sûr égale au diamètre du disque, en l'occurrence 40 cm.

L'introduction d'une telle contrainte bouleverse totalement le problème: de n équations indépendantes, où n est le nombre d'occupants, on passe à un système de n équations couplées.

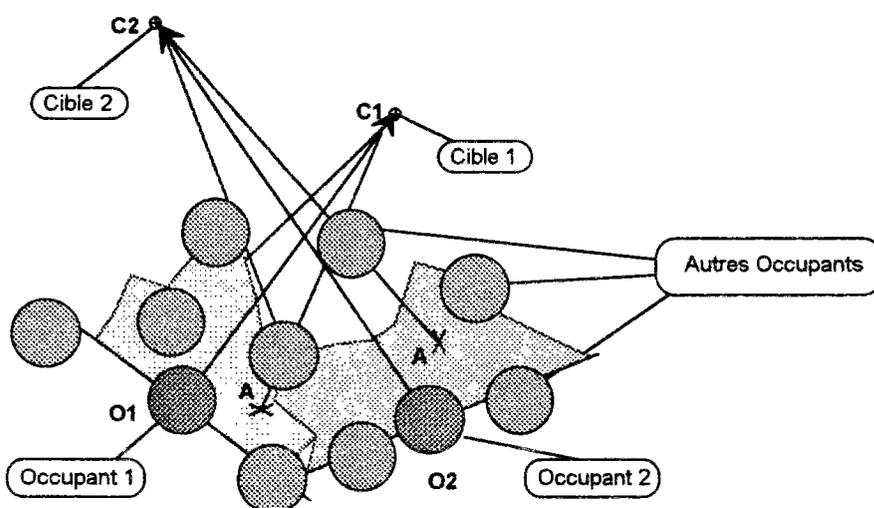


Fig. 144 - Schéma représentant le problème avec contraintes: Comment déplacer de manière optimale chaque disque vers son but de déplacement, sans qu'il ne touche un autre disque?

Le problème se présente donc plutôt comme un système d'équations à minimiser, les solutions devant satisfaire certaines contraintes.

III. APPROCHES AVEC USAGE DE LA BIBLIOTHEQUE MATHEMATIQUE IMSL

C'est donc logiquement que nous nous sommes orientés vers l'usage de la bibliothèque mathématique IMSL. Reformulons le problème:

- Soit n le nombre d'individus.
- Nous cherchons à résoudre le système:

$$\min_{\substack{-90^\circ \leq \alpha_i \leq +90^\circ \\ 0 \leq f_i \leq 1}} dist_i(\alpha_i, f_i), \quad \text{pour } i = 1, n$$

avec:

$$\begin{cases} x_{A_i} = x_{O_i} + f_i \cdot \cos(\alpha_i) \cdot l_{max}(\alpha_i) \\ y_{A_i} = y_{O_i} + f_i \cdot \sin(\alpha_i) \cdot l_{max}(\alpha_i) \end{cases}$$

$$dist_i = (x_{A_i} - x_{C_i})^2 + (y_{A_i} - y_{C_i})^2$$

Les solutions doivent respecter les contraintes indirectes suivantes:

$$(x_{A_i} - x_{A_j})^2 + (y_{A_i} - y_{A_j})^2 > d_{min}^2 \quad \forall (i, j), i \neq j$$

Il s'agit d'un problème d'optimisation avec fonctions de contraintes non linéaires (les contraintes ne sont pas des fonctions linéaires des variables indépendantes), sans oublier les contraintes sur les variables mêmes.

Malgré tous nos efforts, nous n'avons pu traiter correctement ce problème avec les fonctions de la bibliothèque IMSL, bien que dans celle-ci soit proposée une subroutine dédiée justement à ce genre de problèmes, dérivée de l'algorithme de Levenberg-Marquardt.

Un problème évident que nous avons rencontré découle du nombre trop élevé de contraintes: $\frac{n(n-1)}{2}$. Avec 100 occupants nous avons presque 5000 contraintes...

Nous n'avons réussi à résoudre que de petits systèmes, comportant jusqu'à 10 occupants, en regroupant les contraintes en un nombre réduit de fonctions-contraintes, et sans que la convergence de l'algorithme soit systématiquement assurée. Une cause possible de l'échec doit résider dans la forme des fonctions de contraintes. Ces fonctions s'expriment finalement de manière très complexe en fonction des variables indépendantes, de sorte qu'il doit être difficile d'évaluer des gradients de variation en fonction de ces variables.

Nous avons entrepris de multiples tentatives, toutes sans succès, que nous mentionnons de manière sommaire:

- répartition des contraintes en un nombre réduit de fonctions,
- diminution de la complexité du problème en bloquant une des deux variables (déplacement obligatoirement en ligne droite, ou obligatoirement maximal),
- utilisation d'un algorithme de Levenberg classique (sans contraintes), en introduisant un pic dans la fonction à minimiser chaque fois que la distance entre deux occupants se trouve en dessous du seuil, etc...

La tentative la plus intéressante à porté sur une résolution par sous-systèmes: on résout le problème local de chaque occupant, en commençant par celui le plus proche de la sortie. On examine les interactions de l'occupant avec les 10 autre occupants les plus proches. Une fois le système résolu, nous ne gardons que la solution concernant l'occupant traité. Nous le déplaçons, puis répétons la procédure pour le deuxième occupant, sachant que le premier occupant est désormais fixe, etc... Cette voie a dû elle-aussi être abandonnée, car à un moment ou un autre se sont présentés des problèmes de convergence. Nous pensons cependant qu'elle pourrait se révéler intéressante, notamment si un investissement approfondi dans les méthodes numériques de résolution est consenti.

IV. DEPLACEMENT SEQUENTIEL DES OCCUPANTS

La solution du système dans sa globalité étant exclue, il a fallu s'orienter vers d'autres approches. L'idée logique émise par plusieurs personnes ayant contribué à ce travail fut alors de traiter séquentiellement les occupants en commençant par celui le plus proche de la sortie -plus précisément l'occupant ayant la plus petite distance à parcourir pour évacuer. Le premier occupant ne connaît théoriquement aucune contrainte et est déplacé librement; le second devra respecter une distance minimale par rapport au premier, et ainsi de suite... Le système est découplé: chaque occupant est déplacé de manière optimale par rapport à sa cible, tout en respectant les contraintes de distance minimale par rapport aux individus déjà déplacés.

IV.1. Classement des occupants

La mise en oeuvre d'une telle procédure suppose un classement préalable des occupants suivant un critère de distance. Il a fallu accorder une attention accrue au calcul de la distance en coordonnées continues séparant un occupant de la sortie. Les petites approximations initialement adoptées, ont entraîné de petites erreurs de classement des occupants, qui furent cependant suffisantes pour compromettre le succès de la méthode.

Ce critère de distance permet par la suite de classer les occupants. Nous avons bénéficié de l'usage d'un algorithme de tri très rapide qui nous a été aimablement fourni par Laurent Gagliardini du service Acoustique du CSTB.

IV.2. Recherche de la solution optimale

Nous conservons la méthode de recherche de la solution optimale de déplacement: nous balayons tout le domaine de la zone accessible en un seul pas, en tronquant le pas maximal si, dans une direction donnée, la zone initiale recouvre la position d'un disque représentant un occupant déjà déplacé.

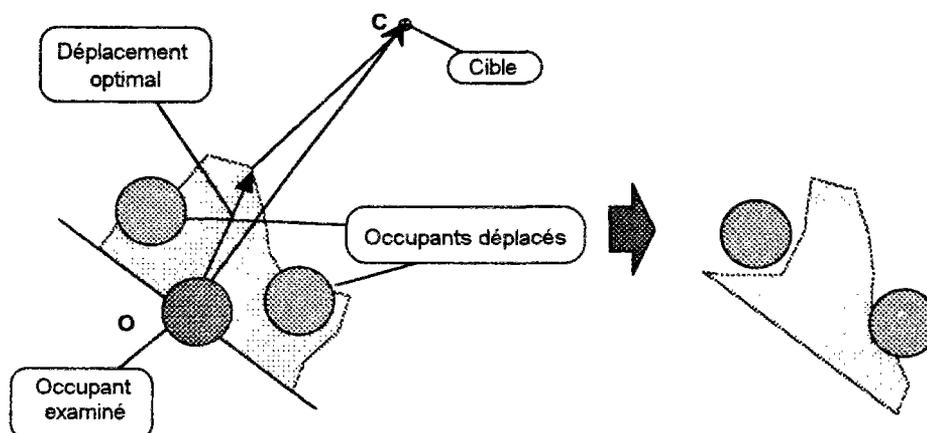


Fig. 145 - Correction de la zone accessible de manière à respecter les contraintes de densité

IV.3. Résultats

Malheureusement, l'application de ce principe n'a pas fourni les résultats souhaités. Nous avons constaté au cours des simulations de très nombreuses violations de la contrainte de distance minimale entre occupants. Ceci s'explique par le phénomène suivant:

- Soient deux occupants relativement proches au début du pas de temps.
- Quand nous examinons les possibilités de déplacement du premier d'entre eux (celui le plus proche de la sortie), nous ignorons complètement l'existence du second. Nous n'effectuons que ce que nous désignerons sous le terme de "contrôle avant", c'est à dire par rapport aux occupant déjà déplacés.
- Or, il arrive souvent que la solution optimale consiste à déplacer cet occupant de sorte que l'occupant suivant soit totalement bloqué, et ne puisse par conséquent satisfaire la contrainte de distance minimale.

Nous illustrons ce phénomène à la figure suivante. Le déplacement de l'occupant A prive l'occupant B de toute possibilité de respect de la contrainte de distance minimale vis-à-vis de l'occupant A.

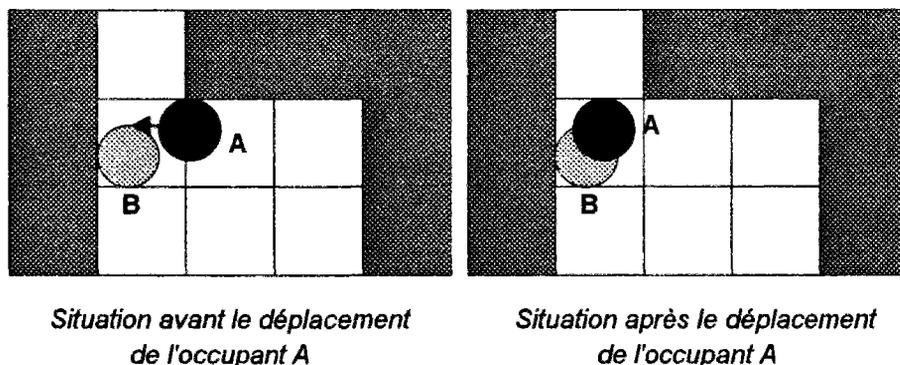


Fig. 146 - Exemple de non respect des contraintes avec le contrôle "avant" seul.

De tels phénomènes se présentent de manière systématique à toutes les restrictions, et plus généralement à toutes les convergences d'occupants. Cette technique a par conséquent dû être abandonnée.

IV.4. Introduction du contrôle global - Arches "numériques"

Nous avons logiquement pensé introduire également le contrôle "arrière": chaque occupant doit être déplacé en considérant les positions de **tous** les occupants, qu'ils aient bougé ou non au cours du pas de temps, comme figées. Ceci permet d'assurer, au moins, que les occupants qui n'ont pas encore bougé peuvent rester sur place sans violation des contraintes. Ceci se révéla malheureusement trop vrai, puisque avec un contrôle global des distances on observe des phénomènes "d'arches numériques" dues au blocage mutuel des occupants. La figure suivante fournit un exemple très simple où aucun des deux occupants ne peut bouger sans violer la contrainte de distance minimale.

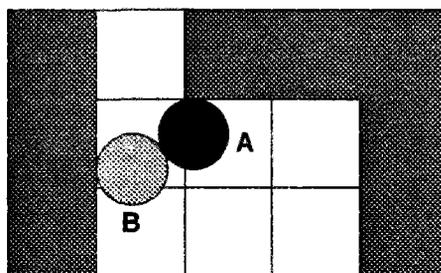


Fig. 147 - Exemple de blocage mutuel des occupants avec un contrôle global (si le pas de temps est suffisamment petit).

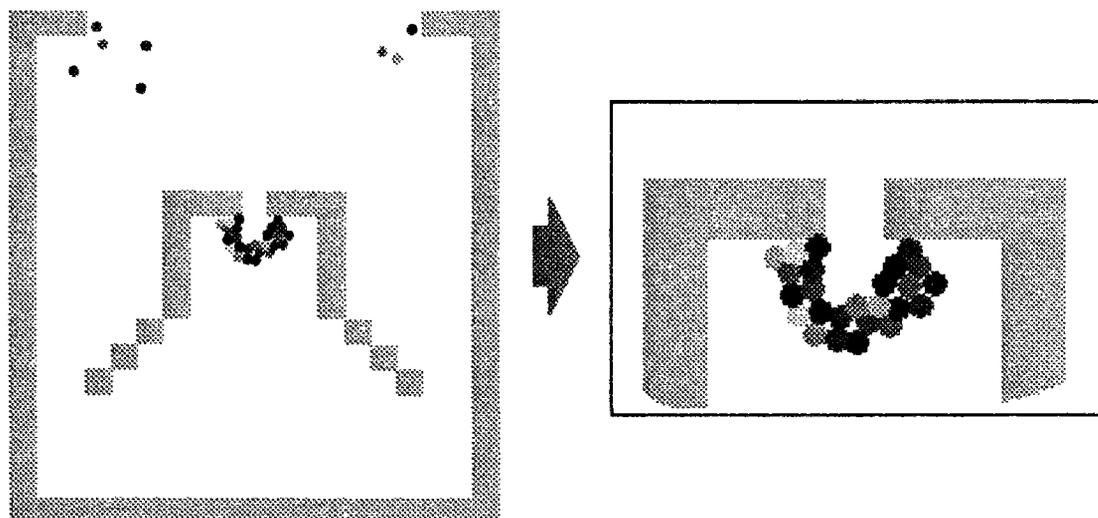


Fig. 148 - Exemple de formation d'arche "numérique" lors d'une simulation avec la configuration "Piège".

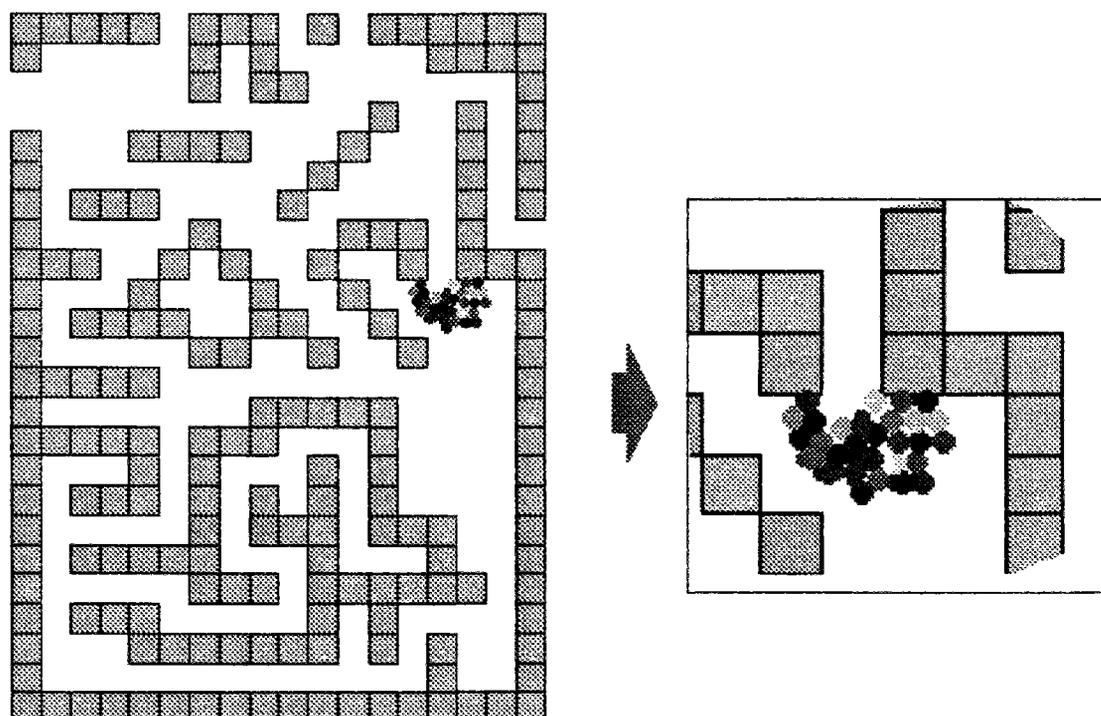


Fig. 149 - Exemple de formation d'arche "numérique" lors d'une simulation avec la configuration "Labyrinthe".

V. SOLUTION RETENUE

Devant la difficulté de résolution du problème, nous avons dû sacrifier à la rigueur scientifique et imaginer des "astuces" permettant de contourner l'écueil. L'idée retenue est d'essayer de briser cette tendance à la formation d'arche. Il est clair sur les exemples précédents que si l'on force le mouvement du premier occupant, l'arche se brise et la situation se débloque automatiquement. Le problème réside dans la difficulté de désigner ce "premier" occupant, car ce n'est pas obligatoirement le plus proche de la sortie, comme on peut le vérifier sur l'exemple de la configuration "Piège".

Ce qui caractérise en tout cas ce premier occupant de l'arche (mais non seulement lui), c'est le fait qu'il n'est soumis à aucune contrainte vis-à-vis d'occupants qui sont déjà déplacés. Nous avons donc imaginé et mis en oeuvre la procédure suivante:

- Nous procédons à un contrôle global des contraintes, sauf exception. Les cas exceptionnels sont ceux pour lesquels un occupant ne possède pas de solution de déplacement sans violation des contraintes, mais n'est pas bloqué en contrôle avant, c'est à dire par un occupant ayant déjà été déplacé. Dans ce cas, nous choisissons de le déplacer:
 - en respectant *impérativement* les contraintes vis-à-vis des occupants déjà déplacés,
 - et en effectuant *la moindre violation possible* des contraintes vis-à-vis des occupants qui ne sont pas encore déplacés.

Rappelons que la violation de cette deuxième catégorie de contraintes n'est pas obligatoirement définitive: lors du déplacement des occupants suivants, il sera tenté de lever cette violation, quitte à ne pas respecter les contraintes vis-à-vis de ceux qui ne sont pas encore déplacés, et ainsi de suite...

Nous avons effectué de nombreuses simulations et avons vérifié, en mesurant à la fois les distances entre occupants et la densité d'occupation, que les cas de violation de la densité maximale sont très rares.

Tous les exemples présentés à la fin du chapitre précédent ont été produits avec le mode de prise en compte des contraintes de distance entre occupants que nous venons de décrire.

C H A P I T R E 9 :

C A L I B R A G E , V A L I D A T I O N E T

E T U D E S D I V E R S E S

Le modèle proposé dans ce travail présente une difficulté particulière pour ce qu'il s'agit de sa validation, étant donné qu'il est orienté vers l'étude de configurations géométriques complexes. N'ayant pas pu procéder, dans le cadre de cette thèse, à des essais d'évacuation spécifiques, nous avons adopté une démarche de comparaison des résultats obtenus avec des méthodes ou des données bibliographiques reconnues.

I. COMPARAISON AVEC LA METHODE RUSSE

La première confrontation doit nécessairement concerner les résultats provenant du modèle élaboré dans le cadre de cette thèse, et ceux obtenus à l'aide de l'application manuelle de la méthode de Predtechenskii et Milinskii, étant donné que ce sont les données de leurs observations qui ont servi de référence pour le calcul de la vitesse des occupants.

La comparaison n'a bien sûr de sens que pour des configurations rectilignes simples, les seules pouvant être traitées correctement avec la méthode russe. Nous allons examiner plusieurs types de configurations, et tout d'abord celle d'un couloir ne présentant pas de changement de largeur.

1.1. Couloir sans changement de largeur

Examinons le cas d'un couloir de 20m de longueur et de 2m de large. A une des extrémité du couloir, un groupe de 40 personnes est étalé sur une longueur de 5m. L'aire de la projection d'une personne étant de 0.125m^2 , nous avons une densité initiale adimensionnelle de 0.5.



Fig. 150 - Forme du couloir étudié

Si l'on considère que le paquet d'occupant se déplace de manière ordonnée, le temps d'évacuation, d'après la méthode russe, est de 73s (conditions normales). Comme un tel mouvement est relativement improbable, les auteurs conseillent de considérer qu'il se manifeste une "diffusion" du flot, selon le terme qu'ils utilisent, c'est à dire que les premiers occupants se déplacent à une densité moindre et à plus grande vitesse que l'arrière du peloton. Il se forme donc deux "paquets" d'occupants à densités différentes, avec une "onde de choc" qui se propage vers la queue de la foule. Après un temps suffisamment long, nous n'avons qu'un seul groupe "dilué" à densité uniforme, celle de la tête de la foule. Si l'on suppose que la tête de la foule "diffuse" à une densité de 0,2, le temps d'évacuation chute à 59s.

La figure suivante est issue d'une simulation effectuée pour cette configuration.

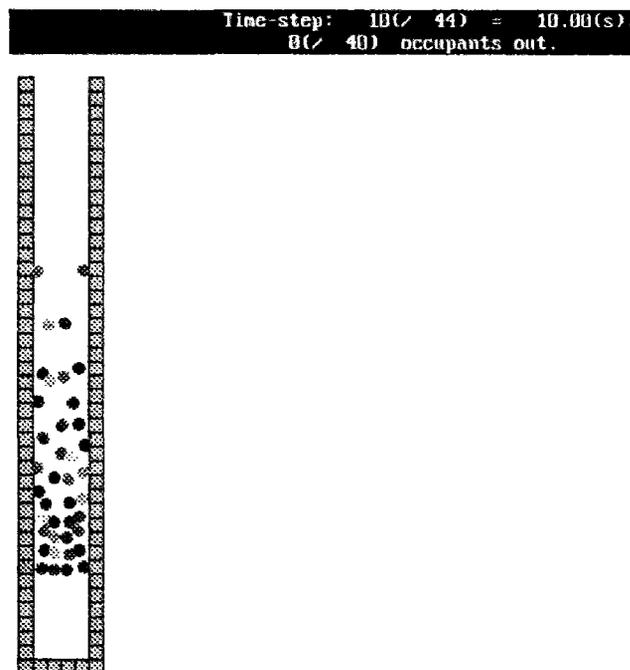


Fig. 151 - Résultat de simulation. Temps d'évacuation: 44s.

Nous remarquons que le temps obtenu par simulation est légèrement inférieur (de 25%). Deux hypothèses peuvent être avancées pour expliquer cette divergence:

1. La différence est due à une imparfaite prise en compte de la densité locale à l'aide du mode de calcul retenu.

2. Le phénomène de diffusion décrit par les auteurs russes se manifeste ici de manière continue dans le temps et dans l'espace, et non seulement en deux phases. Sur la figure précédente on peut constater la diminution progressive de la densité depuis la queue vers la tête du "peloton". La figure suivante montre l'allongement du pas de l'occupant au fur et à mesure que celui-ci s'approche de la sortie.

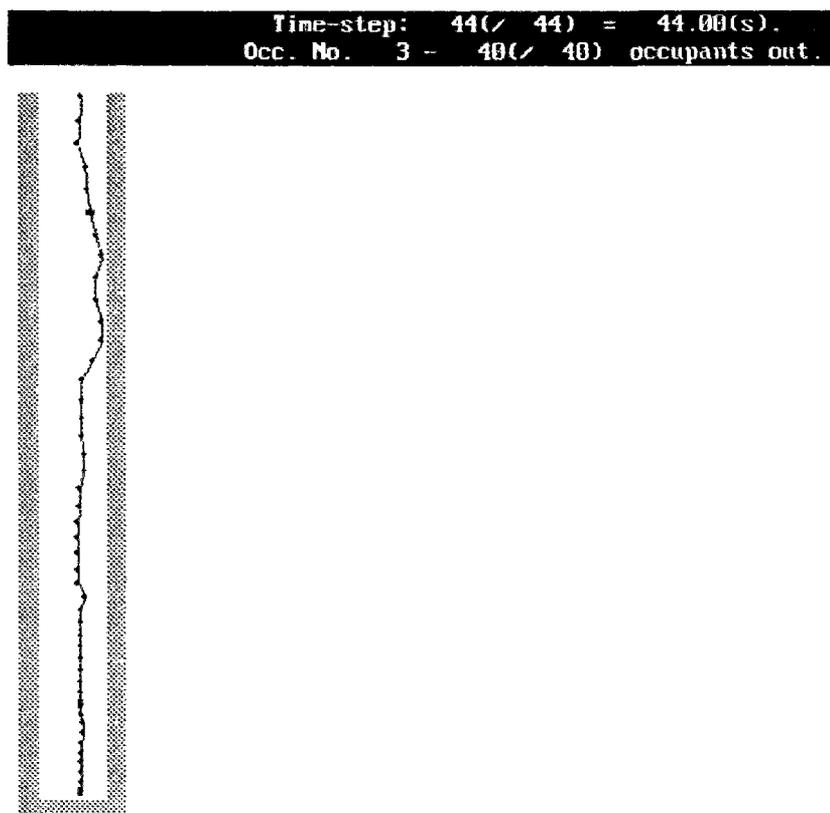
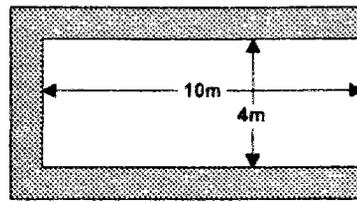


Fig. 152 - Le pas de l'occupant s'allonge de manière continue au cours de son cheminement d'évacuation

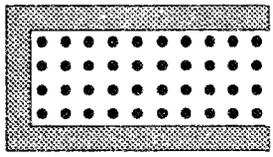
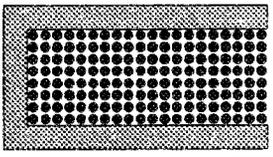
1.2. Couloir sans possibilité d'accélération

L'influence éventuelle du second facteur nous a orienté vers la définition de configurations où l'espace offert au déplacement serait insuffisant pour permettre un développement important d'un tel comportement d'accélération.

Soit un couloir de 10m de long et 4m de large initialement uniformément occupé sur toute sa surface.



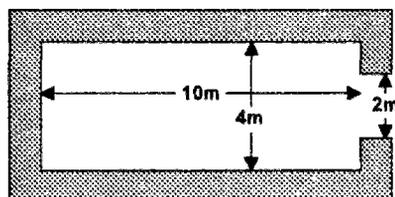
Les configurations et les résultats correspondants sont présentés au tableau suivant.

		
Densité	1 p/m ²	4 p/m ²
Densité adimensionnelle	0,125	0,5
Nb total d'occupants	40	160
Temps d'évacuation Predtechenskii	16s	36s
Résultat simulation	13s	35s

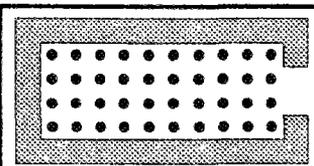
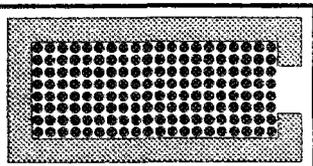
Nous remarquons à présent que l'écart entre la méthode manuelle et la simulation se resserre. Le fait que les résultats de simulation sont légèrement inférieurs aux calculs manuels doit être attribué à la vitesse élevée avec laquelle évacuent les premières "rangées" du couloir. Cette vitesse élevée découle du mode de calcul de la densité, et plus précisément de la forme du rectangle d'influence.

1.3. Couloir avec restriction de la largeur

Une configuration-test plus intéressante est celle présentant une restriction sur le chemin d'évacuation. Supposons le même couloir que précédemment, mais avec une restriction de 2m de large à son extrémité.



Le tableau suivant nous fournit les résultats des comparaisons.

		
Densité	1 p/m ²	4 p/m ²
Densité adimensionnelle	0,125	0,5
Nb total d'occupants	40	160
Temps d'évacuation Predtechenskii	16s	66s
Résultat simulation	14s	61s

Nous remarquons tout d'abord que les résultats sont à nouveau assez proches.

Mais il existe un aspect plus intéressant: nous venons d'examiner quatre variantes du même couloir, avec et sans restriction, et avec une densité de 1 p/m² et de 4 p/m². Nous remarquons que pour la faible densité d'occupation, l'existence de la restriction n'a aucune influence sur le temps total d'évacuation (16s) selon la méthode russe: le débit dans le couloir est inférieur à la capacité de la porte, et il n'y a par conséquent pas de retard dans l'évacuation. La simulation fournit également un résultat presque identique dans les deux cas.

Par contre, dans le cas de la forte densité d'occupation (4 p/m²), l'existence de la restriction provoque presque un doublement du temps d'évacuation selon la méthode russe: le débit dans le couloir dépasse la capacité de la porte et il y a par conséquent formation de retenue en amont du passage. Il est surprenant de constater que l'on retrouve un temps d'évacuation presque identique dans le cas de la simulation. Ce résultat ne dépend pas en effet directement du mode de calcul de la vitesse dans le modèle: le ralentissement dans la simulation provient de l'introduction des contraintes de densité, contraintes qui vont jouer un rôle majeur lors du passage dans la restriction.

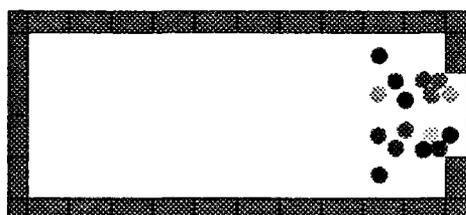


Fig. 153 - Densité initiale: 1 p/m². Image à t=10s.

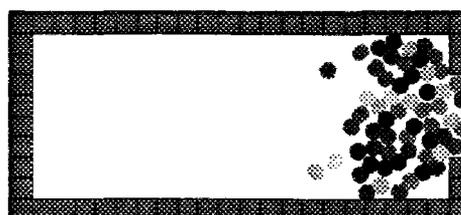
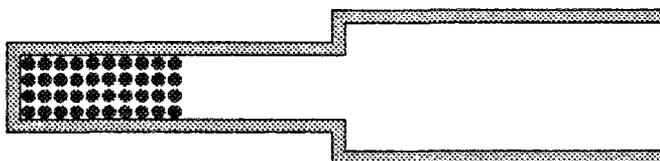


Fig. 154 - Densité initiale: 4 p/m². Image à t= 40s.

1.4. Couloir avec augmentation de la largeur

Pour finir, examinons un couloir comportant un élargissement de sa section au cours du cheminement d'évacuation. Supposons que le couloir de 20m de long sur 2m de large présenté au premier sous-chapitre soit élargi à 4m sur sa seconde moitié.



Le temps d'évacuation selon la méthode russe est de 52s et 50s, respectivement sans et avec "diffusion" à densité 0.2. Le temps d'évacuation fourni par le simulateur est de 44s. Nous remarquons encore une fois que la différence augmente si les occupants disposent d'un espace important devant eux.

1.4. Atténuation de l'accélération

Les essais de calibrage que nous avons effectué ont montré qu'il est aisé d'atténuer l'accélération progressive dont font preuve les premiers occupants. En effet, ce phénomène qui se manifeste dans les calculs par simulation dépend directement de la forme du rectangle d'influence.

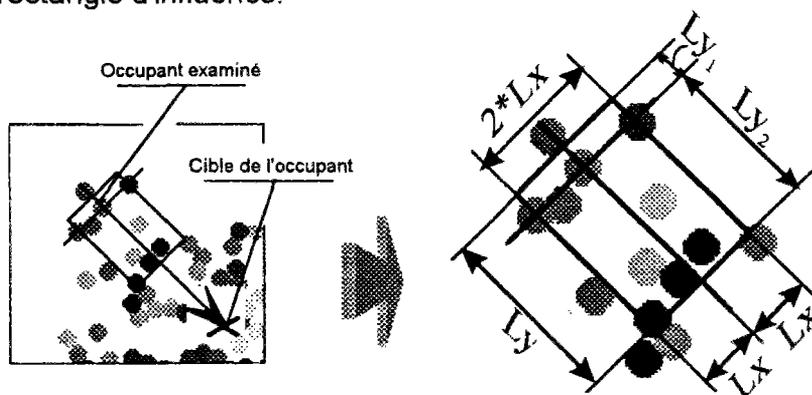


Fig. 155 - Forme du rectangle d'influence.

Valeurs par défaut:

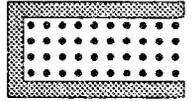
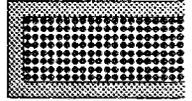
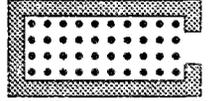
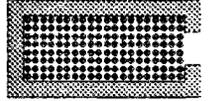
$$Lx = 0.75m$$

$$Ly = 2m \begin{cases} Ly_1 = 0.3m \\ Ly_2 = 1.7m \end{cases}$$

La première rangée d'occupants bénéficie d'une densité locale très faible, puisque le rectangle est très excentré vers l'avant par rapport à la position de l'occupant. Il est par conséquent normal que la vitesse des premiers occupants soit relativement élevée. Par contre, pour la méthode Predtechenskii tous les occupants se trouvent à la même densité. Si l'on veut reproduire cet aspect dans le simulateur, il suffit "d'étirer" le rectangle vers le côté et surtout vers l'arrière. Définissons un rectangle élargi:

<i>Rectangle initial</i>	<i>Rectangle élargi</i>
$Lx = 0.75m$	$Lx = 1.00m$
$Ly = 2m \begin{cases} Ly_1 = 0.3m \\ Ly_2 = 1.7m \end{cases}$	$Ly = 2.5m \begin{cases} Ly_1 = 0.8m \\ Ly_2 = 1.7m \end{cases}$

La réalisation d'un grand nombre de tests a montré que l'usage de ce rectangle élargi permet de recouper avec une précision plus que satisfaisante les résultats d'applications manuelles de la méthode russe. Le tableau suivant offre une comparaison des temps d'évacuation obtenus à l'aide de la méthode de Predtechenskii et du simulateur, avec le rectangle initial et le rectangle élargi, pour les configurations-tests déjà présentées dans ce chapitre.

Configuration	Temps d'évacuation (s)		
	<i>Predtechenskii</i>	<i>Simulateur - Rectangle initial</i>	<i>Simulateur - Rectangle élargi</i>
	59	44	51
	16	13	14
	36	35	37
	16	14	15
	66	61	67
	50	44	49

S'il est vrai que l'usage d'un rectangle d'influence élargi permet de retrouver les résultats d'une application manuelle de la méthode russe, il n'est pas sûr qu'il soit

judicieux d'introduire systématiquement cette réduction de l'accélération progressive. Il ne faut en effet pas perdre de vue que les mesures de corrélation vitesse-densité, les auteurs l'indiquent explicitement, concernent l'état stationnaire d'une personne "noyée" dans une foule à densité constante et uniforme. Ces corrélations ne décrivent nullement le comportement cinématique du "front" d'occupants situés à la tête d'une foule en mouvement. Bien qu'il n'existe pas de données bibliographiques sur le sujet outre le conseil des auteurs russes de considérer que la tête de la foule "diffuse" à faible densité, un comportement d'accélération progressive de la foule, depuis l'avant vers la queue du peloton, ne paraît pas improbable, à l'image d'un groupe de véhicules démarrant depuis le feu vert et accélérant progressivement.

1.5. Conclusion

L'hypothèse principale sur laquelle s'est fondée cette thèse semble se vérifier: il est apparemment possible d'utiliser localement les corrélations vitesse-densité dans un modèle microscopique, et de retrouver un comportement macroscopique conforme qualitativement et quantitativement aux observations et mesures. Ceci n'a réellement été possible que grâce à l'introduction d'un mécanisme permettant de prendre en compte les contraintes physiques de distance minimales entre occupants.

II. DEBIT

En l'absence de validation expérimentale, un autre critère macroscopique de "validation" du modèle peut être la comparaison du débit dans les divers éléments de circulation, par rapport aux valeurs mentionnées dans la littérature (Chap.2 § II.2.). La limite supérieure de débit moyen à une issue au cours d'une simulation que nous avons enregistrée est de 1,5 p/(m.s), alors que la valeur maximale de débit dans une issue conformément aux courbes de Predtechenskii utilisées est de 1,4 p/(m.s). Le simulateur semble donc produire des valeurs de débit vraisemblables.

III. EXEMPLE D'APPLICATION

Il est intéressant de présenter un exemple d'application dans le cadre d'un contrat industriel réalisé par la division Sollicitations Thermiques et Enfumage du Service Feu du CSTB. L'étude étant confidentielle, nous éviterons de fournir certains détails.

Cette étude a eu pour but la détermination de l'ordre de grandeur de l'éclairement énergétique reçu par des personnes, depuis une paroi de protection séparant ces

personnes d'un local en feu. Ces valeurs, déterminées pour des scénarios précis d'incendie (type de feu, configuration géométrique, conditions d'occupation,...) peuvent ensuite être exploitées et permettre de dégager des conclusions utiles quant à la sécurité des personnes soumises au rayonnement thermique de la paroi, et, ainsi, d'évaluer l'aptitude de la paroi à assurer la protection de ces personnes, dans les limites du scénario étudié.

La phase initiale de l'étude a porté sur la détermination expérimentale des émittances thermiques de la paroi étudiée, selon des scénarios d'incendie précis. La valeur instantanée de l'éclairement reçu par une personne ne permet cependant pas, à elle seule, d'évaluer les risques encourus par cette personne: il est impératif d'associer une durée d'exposition au niveau d'éclairement. Cette durée comprend deux aspects: la durée de l'incendie, et la durée de présence des occupants. C'est à ce niveau que nous avons eu recours à une procédure de calcul du temps d'évacuation. A la demande de l'industriel, nous avons imaginé des scénarios défavorables, mais en tout point conformes à la réglementation. Nous allons présenter ici les résultats correspondant à un des scénarios étudiés. Le bâtiment retenu est un Etablissement Recevant du Public dont un étage comporte des bureaux, mais également une salle de réunions. La figure suivante présente le plan de l'étage étudié.

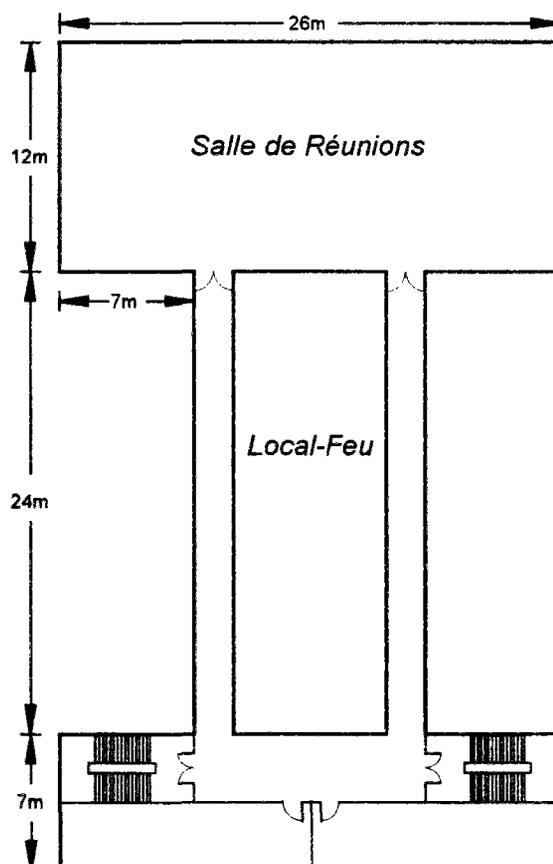


Fig. 156 - Vue en plan du niveau étudié

Les occupants doivent par conséquent évacuer la salle de réunions en empruntant un long couloir les séparant du local en feu. La réglementation suppose une densité de $1p/m^2$. La largeur du couloir est de 2m. Nous avons calculé le temps d'évacuation du couloir à l'aide de la méthode de Predtechenskii & Milinskii, et du simulateur que nous avons développé.

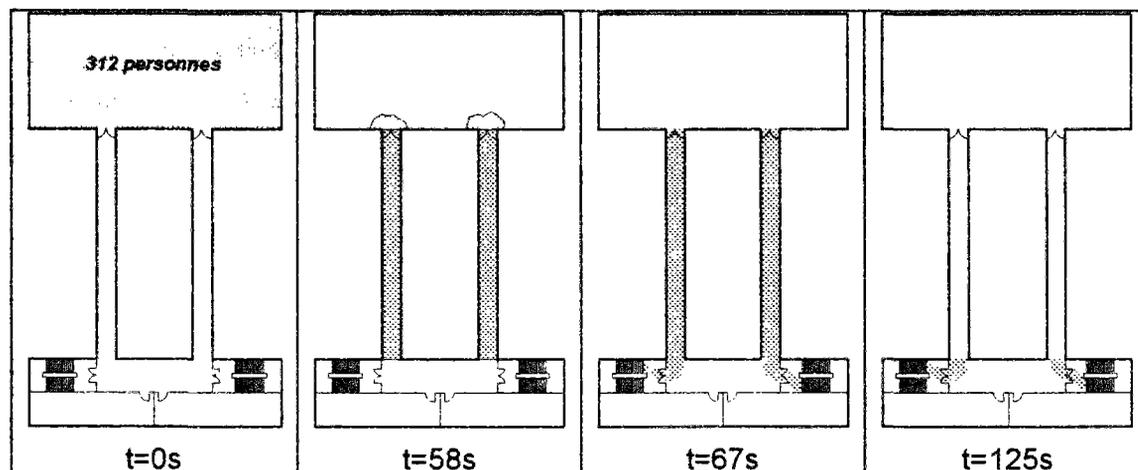


Fig. 157 - Situation à divers instants - Calcul manuel.

Pour les calculs réalisés à l'aide du simulateur, la symétrie nous autorise à n'examiner que la moitié de la salle et un des deux couloirs. Le temps d'évacuation obtenu est très proche de celui provenant du calcul manuel: 122s au lieu de 125s.

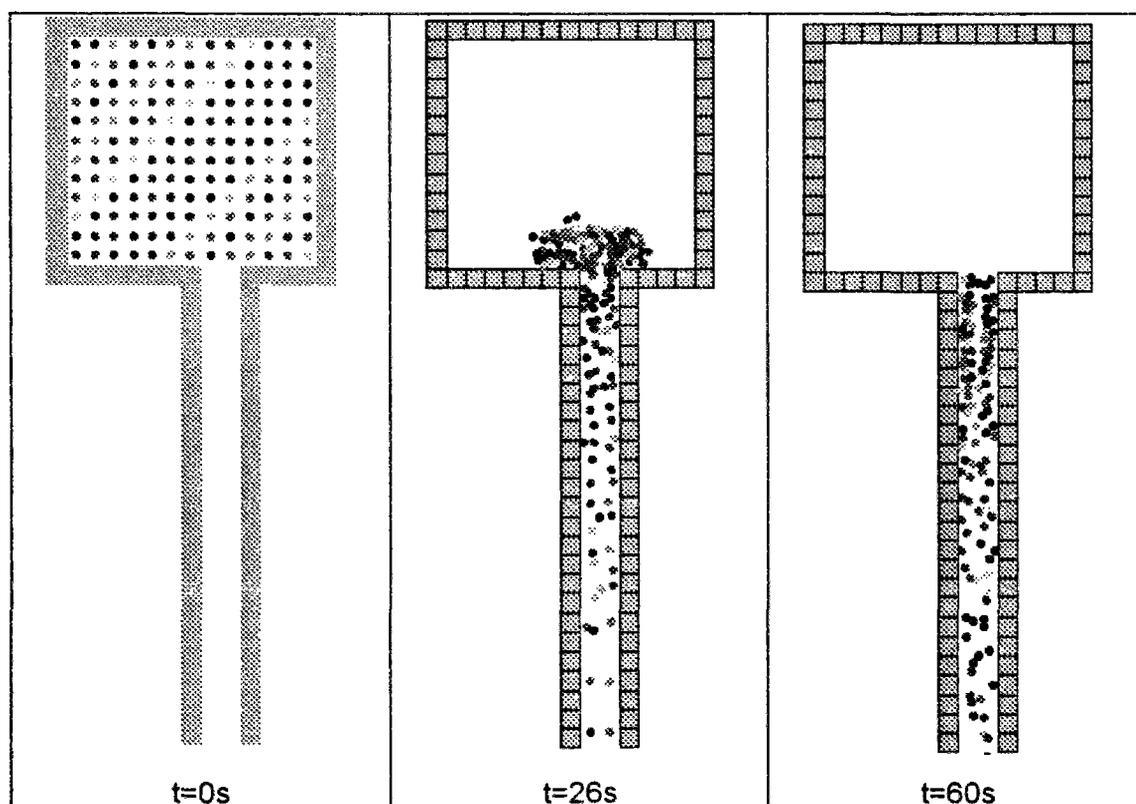


Fig. 158 - Situation à divers instants - Résultat obtenu à l'aide du simulateur.

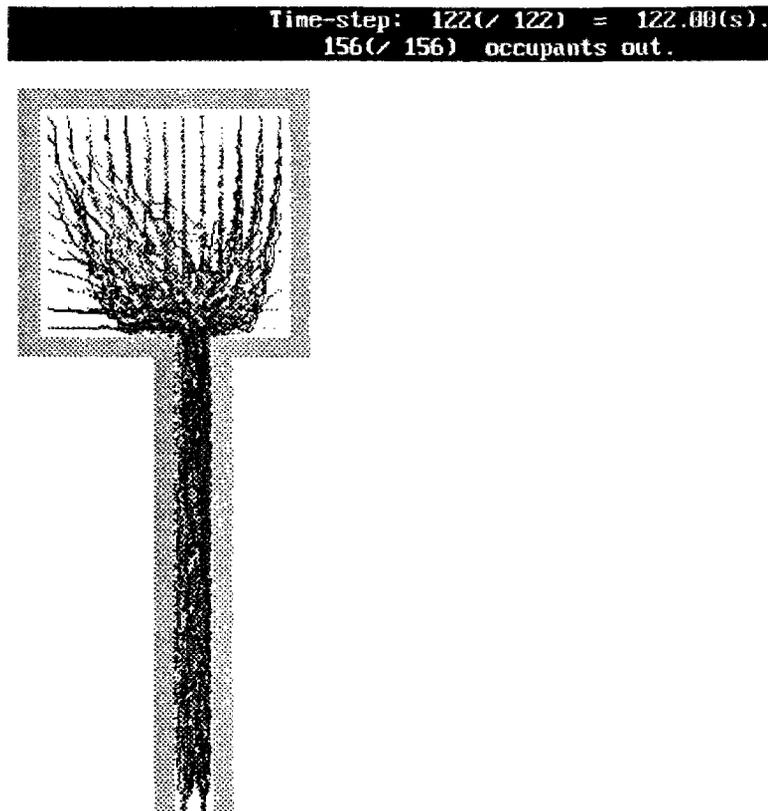


Fig. 159 - Cheminements de tous les occupants

Les données sur le déplacement des personnes ont permis de calculer la durée et le niveau d'éclairage auquel sont soumis les occupants, et d'évaluer par la suite les risques encourus par les évacués, à partir de données bibliographiques.

IV. ASPECTS "CHAOTIQUES"

Essayons à présent d'examiner, sur l'exemple précédent, le temps d'évacuation en fonction de la position initiale à l'intérieur de la salle. Les deux figures suivantes présentent les courbes d'iso-temps d'évacuation.

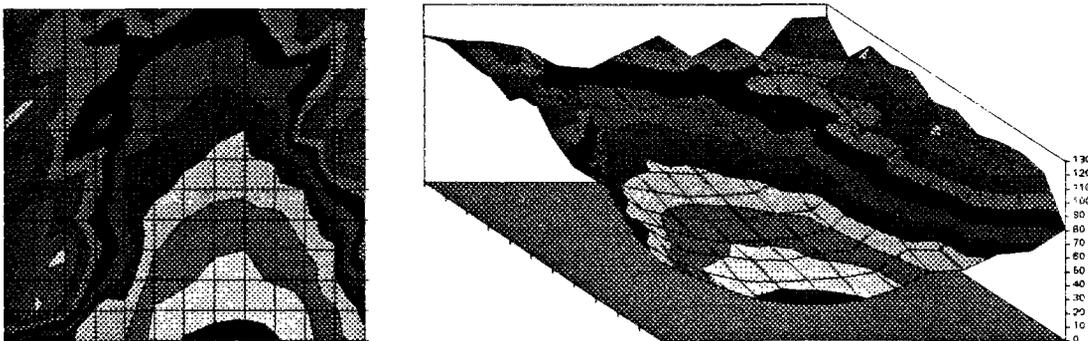


Fig. 160 - Iso-temps d'évacuation en fonction de la position initiale dans la salle

Nous remarquons que la variation du temps d'évacuation au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la sortie n'est pas monotone, et présente au contraire de nombreux accidents localisés. Ainsi, par exemple, le dernier évacuant n'est pas celui initialement le plus éloigné (Figures 161 et 162).

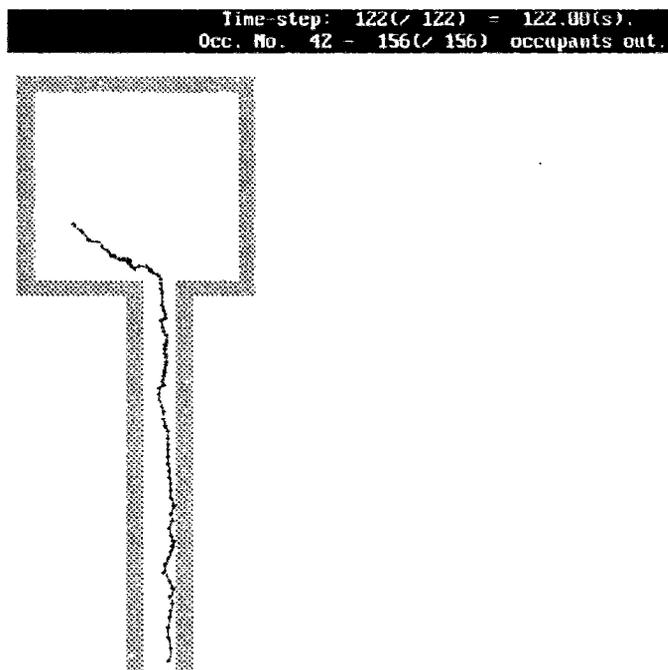


Fig. 161 - Cheminement du dernier évacuant

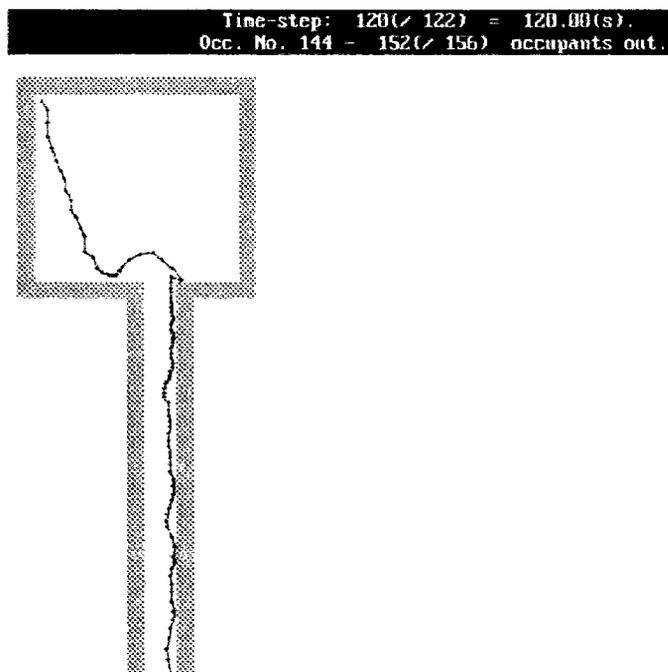


Fig. 162 - Cheminement de l'occupant le plus éloigné.

Nous constatons sur les figures précédentes que l'occupant No.144, bien qu'initialement plus éloigné, par un hasard de circonstances qui l'a amené à un certain moment dans une position favorable, a pu se dégager de la retenue et "dépasser" l'occupant No.42 qui évacuera en dernier. Il est à noter également que l'occupant voisin No.43 évacue en 96 secondes. Ces anomalies sont très fréquentes dans les résultats de simulation. Il est par conséquent possible d'affirmer que le fonctionnement du simulateur peut générer des phénomènes "numériquement" chaotiques, notamment à cause de l'effet superposé de plusieurs algorithmes sensibles à des petites variations de la configuration (chemins optimaux, zone accessible, etc...).

Nous avons mené une étude permettant de mettre en évidence ces phénomènes: nous avons réalisé un grand nombre de simulations (100) sur la configuration précédente, en faisant varier aléatoirement, selon une loi uniforme, les positions des occupants dans un carré de 20 cm de côté, autour des positions de la configuration initiale. Le temps d'évacuation obtenu est quasiment le même pour toutes les simulations, par contre la forme de surface des isovaleurs varie sensiblement d'une simulation à l'autre. En calculant la moyenne du temps d'évacuation pour chaque occupant, nous trouvons cette fois-ci une surface des iso-temps d'évacuation lisse qui présente une forme d'amphithéâtre.

V. SYNTHÈSE FINALE

S'il n'a pas été possible de valider directement le modèle proposé, à l'aide de mesures expérimentales d'évacuation, nous avons pu néanmoins constater les éléments suivants:

- Nous parvenons à reproduire de manière très satisfaisante le comportement macroscopique de la foule tel que décrit par les auteurs russes et d'autres. Ceci concerne aussi bien les aspects qualitatifs (formation de retenues,...) que quantitatifs (temps d'évacuation).
- Qui plus est, le simulateur proposé génère des phénomènes, comme par exemple l'accélération progressive du groupe d'évacuants, qui semblent intuitivement correspondre à des aspects vraisemblables du mouvement des personnes.
- Les valeurs maximales de débit obtenues sont tout à fait conformes aux données existant dans la littérature.

- Le modèle est susceptible de produire des solutions chaotiques au niveau microscopique de chaque occupant, sans pour autant perturber le résultat macroscopique.

Ce modèle constitue un outil qui, au-delà de son exploitation dans le cadre d'études de configurations réelles, offre de très nombreuses possibilités d'exploration à un niveau plus général. Citons quelques exemples d'études intéressantes qui pourraient être menées:

- Variation du temps d'évacuation d'une salle dont on augmente progressivement la densité d'occupation.
- Influence de la position et des dimensions des issues.
- Incidence de la loi vitesse-densité utilisée. Nous pourrions notamment utiliser les lois proposées par d'autres auteurs.
- Influence de l'hypothèse retenue sur la surface au sol par personne.

C H A P I T R E 1 0 :

A S P E C T S I N F O R M A T I Q U E S

Ce sujet d'étude a nécessité un investissement assez important en activités informatiques: développement du simulateur, des interfaces d'entrée/sortie, programmation des algorithmes d'optimisation, utilisation de bibliothèques numériques et graphiques,...

I. PROGRAMMES ELABORES

Quatre programmes principaux ont été élaborés:

- Le programme interactif de saisie textuelle (sur station de travail Unix et sur PC);
- Le programme de saisie graphique (sur station seulement);
- Le simulateur (sur station et sur PC);
- Le visualisateur graphique (sur station et sur PC).

Ces programmes représentent au total plus de 12000 lignes de FORTRAN, dont 4000 pour le simulateur.

1.1. Programmes de saisie

Il est bien connu que l'un des problèmes majeurs des applications informatiques concerne la difficulté de mise en donnée et de saisie du problème à étudier. Bien que la description du site modélisé soit possible par écriture directe du fichier d'entrée, cette opération se révèle assez difficile dès que la configuration est de taille importante. Nous avons donc dû développer des outils spécifiques de saisie. Nous disposons finalement de trois modes principaux de description de la configuration modélisée.

I.1.1. Saisie textuelle interactive

Ce premier outil de description est conversationnel. Il a été développé en FORTRAN et fonctionne sur PC et station Unix, et peut théoriquement être porté sur tout système possédant un compilateur FORTRAN. Il permet de décrire et modifier un fichier de description. Nous pouvons notamment ajouter/retirer des occupants, des murs ou obstacles, etc... en introduisant les coordonnées des éléments décrits. L'utilisateur peut avoir recours à des procédures de remplissage ou d'effaçage automatiques. Il est également possible de décrire les murs sous forme de segments de droite, dont on introduit seulement les coordonnées des deux extrémités. L'interpolation entre ces deux points sur les "pixels" de la grille est réalisée selon l'algorithme de Bresenham, couramment utilisé en CAO.

```
Menu du jour
-----
1- Define bounds of grid
2- Exits
3- Doors
4- Walls
5- Occupants
6- Save to...
7- Save
8- Load
9- Clear an area
10- Clear all
11- (Resort Everything)

12- End

->
```

Fig. 163 - Menu principal du programme de saisie textuelle

II.1.2. Saisie graphique

Ce programme n'est disponible que sur station de travail, car la bibliothèque graphique du FORTRAN pour PC n'intègre pas de gestion de la souris, élément indispensable pour ce programme. Le programme a été développé dans l'environnement X11/Windows sur station Unix.

Nous avons utilisé la bibliothèque graphique normalisée GKS pour développer cette interface. On dispose d'une vue en plan maillée du site modélisé, semblable à celle du visualisateur des résultats de simulation, sur laquelle on peut introduire ou modifier directement à la souris tout élément de description du site (mur, occupants, etc...) à

l'aide d'une boîte de boutons-outils. On peut également générer une sortie papier au format PostScript. La bibliothèque graphique GKS étant normalisée et disponible sur plusieurs plates-formes matérielles, il devrait être théoriquement possible de porter ce programme sur d'autres systèmes.

II.1.3. Convertisseur de fichier bitmap

L'outil graphique précédent n'offre certainement pas la convivialité et efficacité de logiciels professionnels. Or, nous avons déjà laissé sous-entendre qu'une case du maillage pouvait être assimilée à un pixel. Nous pourrions ainsi ramener la description maillée du site à un dessin du type bitmap, sur lequel on "allume" et "éteint" des pixels. Ceci ouvre la voie au recours à l'un des nombreux programmes de dessin bitmap (PaintBrush par exemple sur PC), à condition de savoir "lire" le codage utilisé pour les fichiers générés par ces programmes.

Nous sommes parvenus à décrypter le format des fichiers générés par l'utilitaire "*bitmap*" pour X11/Windows sous Unix, qui, comme son nom l'indique, est un éditeur de bitmap qui permet de tracer très facilement des lignes, des rectangles, des cercles etc... sur un grille de dessin. Nous avons écrit un programme qui se charge de lire le fichier au format bitmap/X11, et de le transcrire au format exigé par le simulateur que nous avons présenté dans ce mémoire. La connaissance du codage des fichiers générés par d'autres éditeurs de bitmap permettrait d'étendre cette procédure.

I.2. Simulateur

Le fichier de description étant prêt, il est possible de procéder à la phase de la simulation. A ce niveau, il faut également indiquer la version de l'algorithme de recherche des chemins optimaux, et le pas de temps à utiliser. Dans la pratique, la plage utile des pas de temps varie de 0,25 à 1s. Le recours à un pas de temps plus petit est d'habitude inutile, alors qu'un pas de temps supérieur à 1s peut entraîner une perte importante de la possibilité de déplacement au cours d'un seul pas, à cause des obstacles physiques. La figure suivante propose un organigramme sommaire du simulateur.

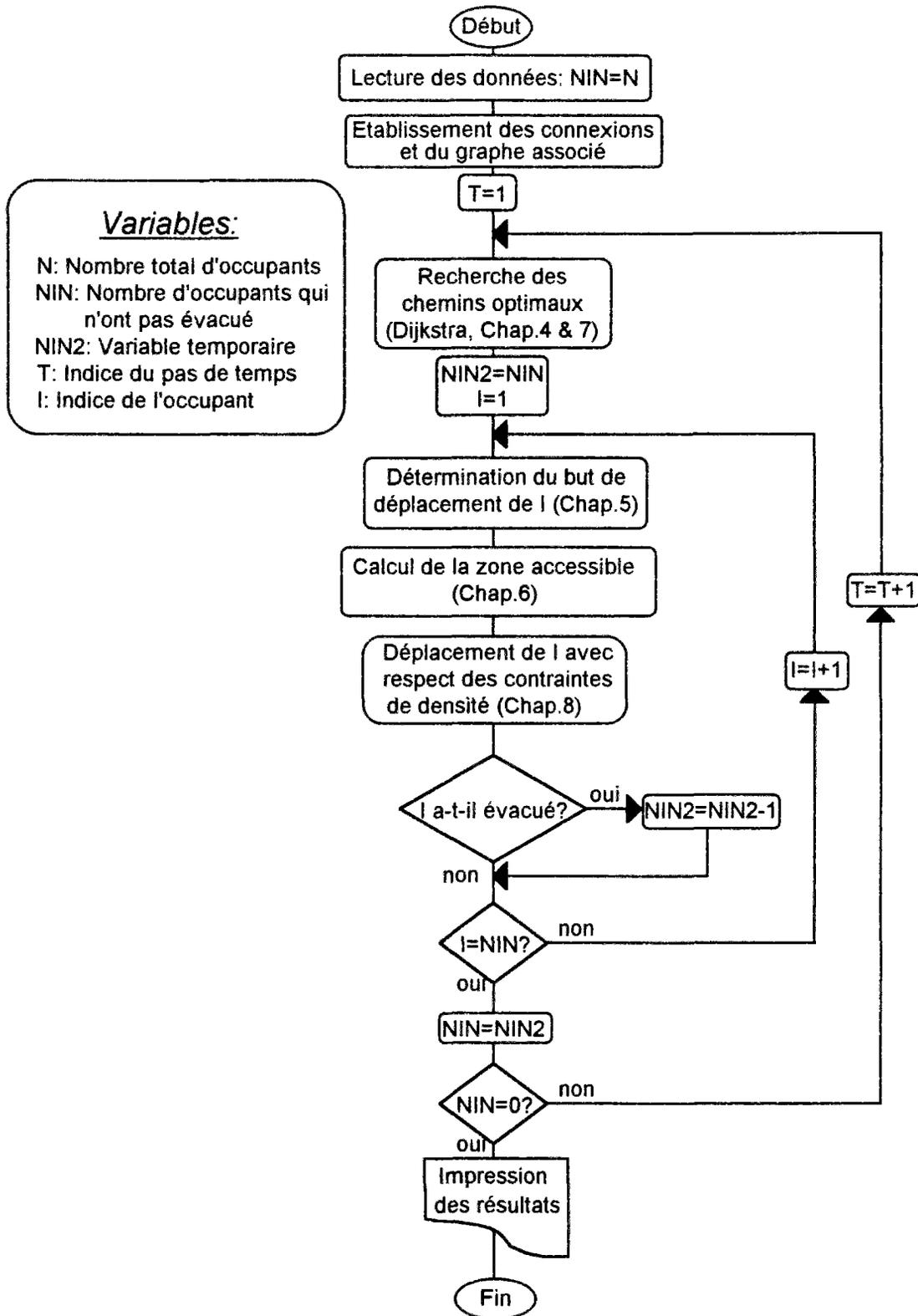


Fig. 164 - Organigramme au premier niveau de décomposition du simulateur

La simulation de l'évacuation du site étudié peut aboutir à la génération des fichiers suivants:

1. Fichier d'arborescence: est indiquée pour chaque case, la case-mère sur l'arborescence d'évacuation.
2. Fichier des "bassins" d'évacuation: pour chaque case, on indique la case-sortie à laquelle elle est rattachée.
3. Fichier sommaire des résultats. Ce fichier nous informe sur le temps total d'évacuation, ainsi que sur la position initiale et finale de chaque occupant.
4. Fichier détaillé par occupant. Pour chaque occupant on indique la position détaillée à chaque pas de temps, la longueur totale parcourue, la longueur parcourue au cours de chaque pas de temps, la déviation par rapport à la ligne droite,...
5. Fichier détaillé par pas de temps. Les mêmes informations sont présentés par pas de temps.

Les 3 derniers fichiers sont bien sûr les plus importants. Nous présentons aux figures suivantes quelques extraits de ces 3 fichiers.

RESULTS OF SIMULATION:									

File Name		: glav2.d							
Grid Size		: 1.00							
Version		: 5							
Total Evacuation Time:		42.00 seconds							
Time-Steps:		42							
Simulation Time-Step:		1.00 seconds							

Occ. No.	Init. Posit.		Evac. Time (sec.)	Time- Step	Initial Dist. (m)	Travel Dist. (m)	Final Cell		Exit No.
	x	y					x	y	
1	2	2	23.00	23	7.41	7.49	9	1	1
2	3	2	16.00	16	6.41	6.36	9	1	1
3	4	2	11.00	11	5.41	5.12	9	1	1
6	7	2	4.00	4	2.41	2.58	9	1	1

Fig. 165 - Extrait d'un fichier sommaire de résultats.

O C C U P A N T No. 7												
		x=		y=								
Time Step	Time (sec.)	Real Position		Cell Pos.		Angles (deg.)			%	Speed (m/s)	Step Len. (m)	Total Length (m)
		x	y	x	y	dir	dev	vir				
0	.00	1.50	3.50	2	4	.0	0	.0	0	.00	.00	.00
1	1.00	1.50	4.45	2	5	90.0	0	90.0	100	.95	.95	.95
Exit Time						:	1.00	seconds				
Exit Time-Step						:	1					
Initial Travel Length Estimate						:	1.00	(m)				
Real Travel Length						:	.95	(m)				
Initial Exit Choice						:	1	x= 2	y= 5			
Exit Really Used						:	1	x= 2	y= 5			

Fig. 166 - Extrait d'un fichier analytique de résultats par occupant.

T I M E S T E P = 40												
											---> 40.00 seconds	
											151 / 156 occupants out.	
Occ	Real Position		Cell Pos.		Angles (deg.)			%	Speed	Step	Total	Rem.
	x	y	x	y	dir	dev	vir		(m/s)	(m)	(m)	
40	8.35	1.55	9	2	357.3	56	-5.4	100	.45	.45	8.68	
55	8.38	.75	9	1	295.2	0	-29.6	100	.50	.50	7.59	OUT!
66	8.50	.49	9	1	269.8	0	-74.2	100	.57	.57	10.31	OUT!
105	8.78	1.40	9	2	277.4	15	-41.9	100	.60	.60	13.79	
106	8.49	1.00	9	2	274.8	2	2.0	100	.46	.46	12.54	
118	7.83	1.19	8	2	322.3	-15	-45.0	100	.40	.40	12.75	
131	8.20	1.22	9	2	359.1	9	-17.0	93	.39	.39	14.14	

Fig. 167 - Extrait d'un fichier analytique de résultats par pas de temps.

Le simulateur a été écrit en FORTRAN et tourne aussi bien sur PC que sur station Unix, et peut théoriquement être porté sur tout système possédant un compilateur FORTRAN. Cependant, la version PC a nécessité un important travail de réduction de la taille des tableaux afin de contourner le problème de la limite de mémoire vive disponible pour les applications MS-DOS (640 Ko) sur ce type d'ordinateur: utilisation de tableaux avec pointeurs, recours à des variables de 1 octet chaque fois que possible,...

1.3. Visualisateurs graphiques

A moins de ne s'intéresser qu'au temps total d'évacuation, ce qui serait dommage pour un simulateur microscopique qui fournit avec précision la position de chaque occupant en fonction du temps, il est évident que l'exploitation des résultats détaillés

exposés ci-dessus est très difficile. A cet effet, nous avons donc développé des utilitaires de "*post-processing*".

Le principal d'entre eux est le visualisateur-animateur graphique. En réalité, il s'agit presque de deux programmes différents, un pour ordinateur compatible PC et un pour X11/Windows, étant donné que les bibliothèques graphiques utilisées sont totalement différentes: la bibliothèque *Microsoft FORTRAN Graphics Library* disponible dans la version 5.1 du FORTRAN de *Microsoft* dans le premier cas, et la bibliothèque GKS (Graphics Kernel System) dans le second. La bibliothèque graphique utilisée sur PC est compatible avec *Microsoft Windows*, ce qui a d'ailleurs permis l'intégration directe des images provenant du visualisateur graphique dans ce document.

Le post-processeur graphique se charge de lire les fichiers de résultats générés par le simulateur et fournit une animation à l'écran de l'évacuation simulée. Ce programme propose de nombreuses options d'utilisation: animation continue, tracé des trajectoires, suivi d'un occupant, impression de l'image,... Le visualisateur s'est révélé être un outil indispensable pendant la phase de développement du modèle. Il a notamment pu mettre en évidence des problèmes difficiles à détecter autrement que visuellement, comme par exemple l'entassement des occupants dans les coudes du cheminement d'évacuation, à cause de la logique de distance minimale. En phase d'utilisation, le post-processeur se montre tout aussi utile, et en certain sens "pédagogique" en permettant de visualiser des phénomènes inhérents au mouvement de foule décrits dans la bibliographie: accumulation en amont des restrictions à l'écoulement d'évacuation, pouvant conduire jusqu'à l'immobilisation temporaire, détente et augmentation de la vitesse après franchissement de la restriction, "diffusion" progressive du flot d'évacuants,...

1.4. Utilitaires divers

Nous avons également développé plusieurs petits utilitaires qui permettent d'examiner certains éléments simples du processus d'évacuation. Citons les deux principaux:

- Le logiciel *Tree* réalise une représentation graphique de l'arborescence d'évacuation.
- L'utilitaire *Exits* fournit des données statistiques sur l'évacuation: temps moyen d'évacuation, distance moyenne parcourue, vitesse moyenne, distance moyenne initiale, pourcentage d'utilisation des issues, débit moyen, débit par pas de temps,...

II. TEMPS DE CALCUL

Une préoccupation constante lors du développement du simulateur a été la réduction du temps de calcul. Celui-ci demeure assez élevé et constitue une des principales causes restreignant le champ d'usage possible du simulateur proposé dans ce travail. D'un autre côté, l'évolution fulgurante du matériel informatique laisse présager que dans quelques années ce problème ne se posera plus. A titre d'exemple, depuis le début de ce travail de thèse (fin 1989) jusqu'aujourd'hui, le temps de calcul a été divisé par 10 sur le matériel dont nous avons successivement disposé au laboratoire d'accueil (du VAX 711 de DEC, à la station Hewlett-Packard série 700 à processeur RISC).

Le temps de calcul dépend fortement du pas de temps choisi, et, naturellement, des données de la simulation (nombre d'occupants, densité d'occupation, distances moyennes aux issues,...). A titre d'exemple, pour 50 occupants, 1 personne par m², 10 à 15 m jusqu'à la sortie, et un pas de temps d'une seconde, le temps de calcul sur une station RISC est de 5 minutes, et sur un PC rapide, d'environ 15 minutes. Pour 500 occupants, 1 personne par m², 50 m en moyenne jusqu'à la sortie, et un pas de temps d'une seconde, le temps de calcul sur une station RISC est de 2 heures (et environ trois fois plus sur un PC).

La réduction du temps de calcul a été principalement obtenue en réduisant le champ des boucles (élimination des cas inutiles, techniques d'indexation,...). Les efforts ont principalement porté sur l'algorithme de Dijkstra, les boucles de recherche des occupants se trouvant dans une zone donnée, l'algorithme d'établissement de la visibilité, et la procédure de calcul des aires nettes des rectangles d'influence (calcul analytique au lieu de numérique).

Il est certain que tous ces aspects sont perfectibles, notamment s'il est fait appel à des connaissances spécifiques à des domaines particuliers de l'algorithmique numérique.

III. AMELIORATIONS ALGORITHMIQUES ENVISAGEABLES

Nous n'indiquons ici que certains éléments de réflexion ou de simples pistes sur des aspects qu'il serait probablement possible d'améliorer, à la fois du point de vue de la réduction du temps de calcul ou de la précision du résultat, mais aussi pour ce qui concerne certaines questions fondamentales de cette thèse.

1. Algorithme de Dijkstra

A chaque itération, l'algorithme effectue deux opérations principales:

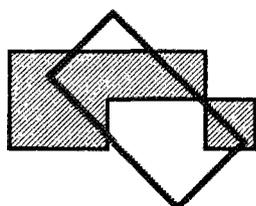
- Il recherche la case présentant le critère minimal, parmi un ensemble de cases,
- puis recalcule éventuellement les variables principales de toutes les cases en utilisant le minimum précédent.

Or, étant donné la faible connexité du graphe par rapport au nombre total de noeuds, seuls quelques noeuds (au plus 8) peuvent être affectés à chaque itération par le noeud minimal identifié. Il est par conséquent inutile d'effectuer des boucles sur toutes les mailles. Il suffirait de recalculer éventuellement les cases affectées, puis de les réintroduire au bon endroit dans une pile de cases déjà classées, à l'aide d'un algorithme de tri "intelligent" tel celui que nous utilisons pour classer les occupants en fonction de leur distance à la sortie. Cet algorithme permet en effet de réaliser des tris partiels, en indiquant seulement les éléments à introduire dans une série déjà triée. A l'itération suivante il suffira de prendre le premier élément de la pile.

2. Calcul des surfaces

Le problème du calcul de l'aire nette du rectangle d'influence, après déduction des cases-obstacles, vu sous un autre angle, présente certaines similitudes avec celui de l'opération de "clipping" en CAO.

Ce terme désigne l'opération suivante:



- Soit un dessin dont les formes élémentaires sont des polygones.
- Nous ouvrons une fenêtre de visualisation rectangulaire sur ce dessin. Que voit-on?

Il est certain qu'il existe des algorithmes standard de clipping utilisés en CAO. Il serait intéressant de les examiner en vue d'une exploitation éventuelle pour le calcul des aires nettes.

3. Optimisation des chemins avec un critère de "temps"

Rappelons que la méthode mise au point pour générer des chemins d'évacuation optimisés avec un critère de "temps" est purement heuristique, et basée sur l'algorithme de Dijkstra. Un travail de fond pourrait être engagé pour la mise au point d'une approche alternative complètement différente et, si possible, plus rigoureuse. Des connaissances spécialisées en théorie des graphes ou en recherche opérationnelle pourraient s'avérer bénéfiques.

4. Résolution du système global

Le plus grand défi "numérique" que soulève le simulateur que nous avons présenté est le traitement du problème de la minimisation du système global d'équations avec prise en compte des contraintes. Cependant, l'étude approfondie de ce problème nécessite des connaissances pointues en techniques numériques de résolution, que nous ne possédons pas. Rappelons également que, dans ce domaine aussi, les techniques algorithmiques évoluent relativement rapidement.

C O N C L U S I O N S E T P E R S P E C T I V E S

Ce travail de thèse a consisté en l'élaboration d'un modèle de mouvement de foule, adapté d'une part au cas des grandes salles et des architectures complexes, et rendant compte d'autre part des phénomènes de congestion inhérents à la présence de foule dense. Ce modèle a suivi une voie innovante et a contribué à combler certaines des lacunes existantes en matière de modélisation du mouvement de personnes.

Le projet a soulevé de nombreux problèmes, insoupçonnés au moment où nous émettions les idées fondamentales de ce modèle, c'est à dire principalement l'utilisation d'une représentation de l'environnement par un maillage en 2 dimensions comme support à la reproduction des phénomènes de congestion et de variation de la vitesse dus à la foule. Nombre de ces problèmes furent de nature algorithmique et auraient nécessité, en toute rigueur, d'avoir recours à des connaissances pointues dans des domaines spécifiques aussi variés que la théorie des graphes (Dijkstra, optimisation sur un critère de temps), la CAO (visibilité, clipping pour le calcul des surfaces), ou le calcul numérique (résolution du système d'équations du déplacement). D'autres difficultés ont découlé de problèmes se rapportant à des aspects comportementaux, etc...

Ce travail a finalement abouti à un simulateur d'évacuation, permettant de reproduire en coordonnées 2D continues le déplacement d'occupants à haute densité. Le modèle proposé est difficilement validable, même expérimentalement. Nous n'avons pu juger de sa pertinence que par comparaison avec des méthodes éprouvées de calcul, et ce dans le cas de configurations linéaires simples. Cette comparaison a montré que les résultats du simulateur sont en concordance avec ceux obtenus à l'aide d'une application manuelle de la méthode russe. Le jugement de la pertinence apparente, et le dépistage d'erreurs lors de la phase de développement, ont été grandement facilités par la mise au point et l'utilisation du "post-processeur" graphique, qui permet d'animer sur l'écran de l'ordinateur des simulations

d'évacuation du bâtiment. L'utilisation du post-processeur peut revêtir un caractère pédagogique, puisqu'elle permet l'appréhension et visualisation des phénomènes inhérents au mouvement de foule décrits dans la bibliographie: accumulation en amont des restrictions à l'écoulement d'évacuation, pouvant conduire jusqu'à l'immobilisation temporaire, détente et augmentation de la vitesse après franchissement de la restriction, "diffusion" du flot d'évacuation,...

Certains inconvénients peuvent être reprochés à l'approche proposée. Nous pouvons tout d'abord mentionner certaines faiblesses d'ordre théorique: plusieurs choix ont été opérés à partir de considérations intuitives, ou même de bon sens, étant donné qu'une démarche scientifiquement rigoureuse semble difficile à l'heure actuelle. Ceci concerne surtout le parti pris d'introduire des critères d'optimisation, que ce soit en distance ou en temps, pour la détermination des trajectoires d'évacuation. Ceci met à nouveau en évidence les limites d'une approche purement technique du problème de la modélisation du mouvement de foule: à un moment ou un autre le modélisateur est contraint d'avoir recours à des hypothèses réductrices de représentation du comportement. Dans le même ordre de critiques, il est également possible de reprocher au modèle proposé son caractère strictement déterministe. Il est certain que le modèle gagnerait en pertinence à intégrer certaines composantes aléatoires dans son fonctionnement, ce qui permettrait par exemple de réaliser d'intéressantes études de sensibilité. A supposer que les problèmes de temps de calcul soient résolus, ce travail devrait être mené avec prudence car, d'un autre côté, et pour présenter les choses de manière caricaturale, on observe à notre avis trop souvent des approches aléatoires où l'on se contente d'introduire un bruit en entrée pour constater principalement que l'on obtient du bruit en sortie, et que finalement les résultats obtenus sont difficilement exploitables.

D'un point de vue pratique, la démarche proposée souffre d'une certaine lourdeur à plusieurs niveaux, notamment en raison du volume d'informations traitées: saisie, temps de calcul, traitement des résultats,... Nous avons en partie atténué ces problèmes en développant des outils graphiques de pré- et de "post-processing", et en nous efforçant systématiquement d'obtenir des gains en temps de calcul. Il n'en demeure pas moins que la démarche est compliquée, un peu à l'image d'un modèle de champs s'il est comparé à un modèle de calcul basé sur les volumes finis.

Nous pensons que la voie originale proposée dans ce travail peut être avantageusement poursuivie selon plusieurs directions:

- Une réflexion devrait être engagée dans l'intention de rompre avec le caractère strictement déterministe de l'approche.
- Il serait intéressant d'examiner des moyens de décomposer des sites en sous-problèmes que l'on peut traiter séparément.
- Une autre voie de développement pourrait concerner des tentatives de suppression totale du maillage, afin de ne travailler que sur un plan continu.
- Une réflexion pour l'utilisation de solutions numériques de minimalisation du système d'équations avec contraintes semble nécessaire.
- Il est enfin souhaitable de réaliser certains aménagements informatiques par rapport à la version actuelle du simulateur (rajout d'escaliers, de points de passage obligatoires, accélération,...).

Une étape importante, préalable à un développement futur du modèle, devra être consacrée à la réalisation d'essais en vraie grandeur pour le calibrage et une validation plus approfondie du modèle.

Une phase ultérieure de développement pourrait être consacrée à la conceptualisation, puis à la réalisation de couplages entre ce modèle d'évacuation et divers modèles physiques ou probabilistes déjà existants (enfumage, tenabilité,...).

R E F E R E N C E S

B I B L I O G R A P H I Q U E S

1. [ALVORD 83] Alvord D.M., "The Escape and Rescue Model : A Simulation Model for the Emergency Evacuation of Board and Care Homes", National Bureau of Standards (N.B.S.), December 1983
(ref. NBS : NBS-GCR 83-453)
2. [ALVORD 84] Alvord D.M., "The Fire Emergency Evacuation Simulation for Multifamily Buildings", National Bureau of Standards (N.B.S.), December 1984
(ref. NBS : NBS-GCR 84-483)
3. [ALVORD 85] Alvord D.M., "*Status Report on the Escape And Rescue Model and the Fire Emergency Evacuation Simulation for Multifamily Buildings*", National Bureau of Standards (N.B.S.), June 1985
(ref. NBS : NBS-GCR 85-486)
4. [BERL 82] Berl C. & Holpin M., "*Incendies avec morts humaines*", Revue Générale de Sécurité, No.13, p.30, avril 1982
5. [BERLIN 82a] Berlin G.N., Dutt A. & Gupta S.M., "*Modeling Emergency Evacuation from Group Homes*", Fire Technology, Vol.18, No.1, p.38-48, February 1982
6. [BERLIN 82b] Berlin G.N., "*A Simulation Model for Assessing Building Firesafety*", Fire Technology, Vol.18, No.1, p.66-76, February 1982
7. [BERLIN 82c] Berlin G.N., "*The Use of Directed Routes for Assessing Escape Potential*", Fire Technology, Vol.14, No.2, p.126-135, May 1982
8. [BICKMAN 79] Bickman L., Herz E., Edelman P. & Rivers D., "*An Evaluation of Planning and Training for Fire Safety in Health Care Facilities -- Phase Two*", National Bureau of Standards (N.B.S.), January 1979
(ref. NBS : NBS-GCR 79-179)
9. [BIRKY 82] Birky M., "*Progress Report on Smoke Inhalation Injury*", Center for Fire Research, National Bureau of Standards, Proceedings of the 6th Joint Panel Meeting of the UJNR Panel on Fire Research & Safety, Tokyo/Tsukuba, 10-14 May 1982, p.133-139, produced by the Building Research Institute, Ministry of Construction, Japanese Government
10. [BREAUX 76] Breaux J., Canter D., Sime J., "*Psychological Aspects of Behavior of People in Fire Situations*", Fire Research Unit, University of Surrey, U.K., 1976
11. [BRYAN 76] Bryan J.L., "*Human Behavior in Fire Situations*", Proceedings of the 2nd Joint Panel Meeting of the 2nd UJNR Panel on Fire Research & Safety, Tokyo, 19-22 October 1976, p.181-240, produced by the Building Research Institute, Ministry of Construction, Japanese Government
12. [BRYAN 77] Bryan J.L., "*Smoke as a Determinant of Human Behavior in Fire Situations (Project People)*", National Bureau of Standards (N.B.S.), June 1977
(ref. NBS : NBS-GCR 77-94)

13. **[BRYAN 81]** Bryan J.L. & J.A.Milke, *"The Determination of Behavior Response Patterns in Fire Situations, Project People II. Final Report - Health Care"*, National Bureau of Standards (N.B.S.), September 1981
(ref. NBS : NBS-GCR -81-343)
14. **[BRYAN 82a]** Bryan J.L., *"The MGM Grand Hotel Fire - A Case Study of Human Reaction to Fire"*, Proceedings of the 6th Joint Panel Meeting of the UJNR Panel on Fire Research & Safety, Tokyo/Tsukuba, 10-14 May 1982, p.218-250, produced by the Building Research Institute, Ministry of Construction, Japanese Government
15. **[BRYAN 82b]** Bryan J.L., *"Project People II - An Extended Interview Study of Behavior Response Patterns in Health Care Facility Fire Incidents"*, Proceedings of the 6th Joint Panel Meeting of the UJNR Panel on Fire Research & Safety, Tokyo/Tsukuba, 10-14 May 1982, p.251-281, produced by the Building Research Institute, Ministry of Construction, Japanese Government
16. **[BRYAN 88]** Bryan J.L., *"Behavioral Response to Smoke and Fire"*, Sec. 1, Chap. 16, "The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", National Fire Protection Association, Quincy, MA 02269, U.S.A., 1988
ISBN: 0-87765-353-4
17. **[CANTER 80]** Canter D., *"Fire and Human Behaviour"*, J.Wiley & Sons , N.Y., 1980
18. **[CANTER 85]** Canter D., *"Studies of Human Behavior in Fire: Empirical Results and their Implications for Education and Design"*, Building Research Establishment, UK, 1985
ISBN: 0-85125-343-1
19. **[CHALMET 82]** Chalmet L.G., Francis R.L. & Saunders P.B., *"Network Models for Building Evacuation"*, Fire Technology-N.F.P.A., Vol.18, No.1, p.90-113, February 1982
20. **[CLUSEL 82]** Clusel D. & Sarrat P., *"Evacuation des personnes"*, Revue Générale de Sécurité, No.13, p.20-28, avril 1982
21. **[CLUSEL 85]** Clusel D. & P.Sarrat, *"Etablissements Recevant du Public - Analyse des conditions d'évacuation d'urgence"*, Revue Générale de Sécurité, No.40, p.21-26, janvier 1985
22. **[COUSINS 83]** Cousins J.H., Siegel A.W. & Maxwell S.E., *"Way-Finding and Cognitive Mapping in Large-Scale Environments: A Test of Development Model"*, University of Houston, Journal of Experimental Child Psychology, 35, p.1-20, 1983
23. **[CROSSON 82]** Crosson J.J., Stahl F.I. & Margulis S.T., *"Time-Based Capabilities of Occupants to Escape Fires in Public Buildings: A Review of Code Provisions and Technical Literature"*, National Bureau of Standards (N.B.S.), April 1982
(ref. NBS : NBSIR 82-2480)
24. **[DERRY 82]** Derry L., *"Les feux provoquant des morts: processus, scénarios"*, Revue Générale de Sécurité, No.13, p.31-34, avril 1982
25. **[EVANS 84]** Evans G.W., Skorpanich M.-A., Gärling T., Bryant K.J. & Bresolin B., *"The Effects of Pathway Configuration, Landmarks and Stress on Environmental Cognition"*, Journal of Environmental Psychology, p.323-335, No.4, 1984
26. **[FACE 92]** Face au Risque, *"La panique aux rayons X"*, Face au Risque No.280, p.66-72, Février 1992

27. **[FAHY 91]** Fahy R.F., "*EXIT89: An Evacuation Model for High-Rise Buildings*", Fires Safety Science - Proceedings of the 3rd International Symposium of International Association for Fire Safety Science (IAFSS), p.815-823, Editors G.Cox, B.Langford, Elsevier Applied Science, London and New York, 1991
ISBN: 1-85166-719-9
28. **[FRANCIS 79a]** Francis R.L. & Saunders P.B., "*EVACNET: Prototype Network Optimization Models for Building Evacuation*", National Bureau of Standards (N.B.S.), October 1979
(ref. NBS : NBSIR 79-1738)
29. **[FRANCIS 79b]** Francis R.L., "*A Simple Graphical Procedure to Estimate the Minimum Time to Evacuate a Building*", Technology Report-S.F.P.E.-79-5, 1979. Also in Appendix B of previous document.
30. **[FRANCIS 82]** Francis R.L. & Kisko T.M., "*Network Models of Building Evacuation: Development of Software System*", National Bureau of Standards (N.B.S.), December 1982
(ref. NBS : NBS-GCR 82-417)
31. **[FRANCIS 84a]** Francis R.L. & Kisko T.M., "*Network Models of Building Evacuation: Development of Software System*", National Bureau of Standards (N.B.S.), May 1984
(ref. NBS: NBS-GCR 84-457)
32. **[FRANCIS 84b]** Francis R.L., "*A Negative Exponential Solution to an Evacuation Problem*", National Bureau of Standards (N.B.S.), December 1984
(ref. NBS : NBS-GCR 84-482)
33. **[FRANCIS 85]** Francis R.L. & Kisko T.M., "*Network Models of Building Evacuation: Development of Software System*", National Bureau of Standards (N.B.S.), March 1985
(ref. NBS : NBS-GCR 85-489)
34. **[FRANCIS 86]** Francis R.L. & Kisko T.M., "*EVACNET+: A Building Evacuation Computer Program*", Fire Technology, Vol.18, No.1, p.75-76, February 1986
35. **[FRUIN 71]** Fruin J.J., "*Pedestrian Planning and Design*", Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners Inc., New York, 1971
36. **[GALBREATH 69]** Galbreath M., "*Time of Evacuation by Stairs in High Buildings*", National Research Council of Canada, Fire Research Note No.8, May 1969
37. **[GUYONNET]** Guyonner J.-F., "*Sécurité des Systèmes*", Cours au DEA "*Sciences et techniques du bâtiment*", ENPC - PARIS VI - Ecole Centrale de Paris, 1988-1989
38. **[HERZ 78]** Herz E., Edelman P. & Bickman L., "*The Impact of Fire Emergency Training on Knowledge of Appropriate Behavior in Fires*", National Bureau of Standards (N.B.S.), January 1978
(ref. NBS : NBS-GCR 78-137)
39. **[HORIUCHI 76]** Horiuchi S., "*On the Human Behavior in the Fire Situation*", Proceedings of the 2nd Joint Panel Meeting of the 2nd UJNR Panel on Fire Research & Safety, Tokyo, 19-22 October 1976, p.241-262, produced by the Building Research Institute, Ministry of Construction, Japanese Government
40. **[HORIUCHI 80]** Horiuchi S., "*An Experimental Study on Exit Choice Behavior of Occupants in an Evacuation under Building Fire*", p.173-185, in B.M.Levin, R.L.Paulsen (eds.), "*Second International Seminar on Human Behavior in Fire Emergencies*", National Bureau of Standards, 1980
(ref. NBS : NBSIR 80-2070)

41. [JIN 82] Jin T., "Studies of Emotional Instability in Smoke Fires - Decrease of Thinking Powers and of Memory in Fire Smoke", p.180-190, Proceedings of the 6th Joint Panel Meeting of the UJNR Panel on Fire Research & Safety, Tokyo/Tsukuba, 10-14 May 1982, produced by the Building Research Institute, Ministry of Construction, Japanese Government
42. [JIN 88] Jin T. & Yamada T., "Emotional Instability in Fire Smoke", Proceedings of the 9th Joint Panel Meeting of the UJNR Panel on Fire Research & Safety, Norwood, Massachusetts, 4-8 May 1987, p.280-293, Produced by N.H.Jason, B.A.Houston, Center for Fire Research, National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce, April 1988 (ref. NBS : NBSIR 88-3753)
43. [JIN 90] Jin T. & Yamada T., "Experimental Study on Human Emotional Instability in Smoke Filled Corridor: Part 2", Journal of Fire Sciences, Vol.8, p.124-134, March/April 1990
44. [KAHN 84] Kahn M.J., "Human Awakening and Subsequent Identification of Fire-Related Cues", Fire Technology, Vol.20, No.1, p.20-26, February 1984
45. [KEATING 84] Keating J.P. & Loftus E.F., "Post-Fire Interviews : Development and Field Validation of the Behavioral Sequence Interview Technique", National Bureau of Standards (N.B.S.), October 1984 (ref. NBS : NBS-GCR-84-477)
46. [KEATING 85] Keating J.P., "Human Response During Fire Situations: A Role for Social Engineering", University of Washington, Seattle, Department of Psychology, March 1985
47. [KEATING 87] Keating J.P., "The Myth of Panic", Fire Journal, p.57-62, May 1987
48. [KENDIK 85] Kendik E., "Assessment of Escape Routes in Buildings and a Design Method for Calculating Pedestrian Movement", Technology Report 85-4, Society of Fire Protection Engineers, 60 Batterymarch Street, Boston, Massachusetts 02110, May 85
49. [KENDIK 86] Kendik E., "Designing Escape Routes in Buildings", Fire Technology, Vol.22, p.272-294, November 1986
50. [KLOTE 92] Klote J.H. & Alvord D.M., "Routine for Analysis of the People Movement Time for Elevator Evacuation", National Institute of Standards and Technology (N.I.S.T.), February 1992 (ref. NIST: NISTIR 4730)
51. [KOSTREVA 90] Kostreva M.M., Wiecek M.M. & Getachew T., "Mathematical Modeling of Human Egress from Fires in Residential Buildings", Summaries of Center for Fire Research In-House Projects and Grants - 1990, NIST, pp.135-137, October 1990
52. [KOSTREVA 91] Kostreva M.M., Wiecek M.M. & Getachew T., "Optimization Models in Fire Egress Analysis for Residential Buildings", Fires Safety Science - Proceedings of the 3rd International Symposium of International Association for Fire Safety Science (IAFSS), p.805-814, Editors G.Cox, B.Langford, Elsevier Applied Science, London and New York, 1991 ISBN: 1-85166-719-9
53. [KREYSZIG 88] Kreyszig E., "Advanced Engineering Mathematics", Sixth Edition, p.1144-1147, John Wiley & Sons Inc., New York, 1988.
54. [LARDEUX 90a] Lardeux E., "Etude bibliographique critique des techniques de modélisation de mouvements de foule", Société Générale de Techniques et d'Etudes, Nanterre, France, mars 1990

55. [LARDEUX 90b] Lardeux E., "*Etude de faisabilité d'un outil d'analyse des mouvements de foule*", Société Générale de Techniques et d'Etudes, Nanterre, France, décembre 1990
56. [LARDEUX 91] Lardeux E., "*Développement d'algorithmes pour l'analyse des mouvements de foule*", Société Générale de Techniques et d'Etudes, Nanterre, France, décembre 1991
57. [LARDEUX 92] Lardeux E., "*La modélisation des mouvements de foule*", Thèse de Doctorat, Université de Rennes I, septembre 1992
58. [LERUP 77a] Lerup L., "*People in Fires: A Manual for Mapping*", National Bureau of Standards (N.B.S.), 1977
59. [LERUP 77b] Lerup L., Cronah D. & Chiang Liu J.K., "*Human Behavior in institutional Fires and its Design Implication*", National Bureau of Standards (N.B.S.), February 1977
60. [LEVIN 84] Levin B.M., "*Human Behavior in Fire: What we Know Now*", SFPE Fire Protection Engineering Seminars, New Orleans, 21-24 May 1984, SFPE Technology Report 84-3
61. [LEVIN 87] Levin B.M., "*EXITT: A Simulation Model of Occupants Decisions and Actions in Residential Fires : Users Guide and Program Description*", National Bureau of Standards (N.B.S.), July 1987 (ref. NBS : NBSIR 87-3591)
62. [LEVIN 88] Levin B.M., "*EXITT: A Simulation Model of Occupant Decisions and Actions in Residential Fires*", National Bureau of Standards (N.B.S.), p.280-293, 9th Joint Panel Meeting of the UJNR Panel on Fire Research & Safety, N.H.Jason, B.A.Houston, Center for Fire Research, National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce, April 1988 (ref. NBS : NBSIR 88-3753)
63. [LING 82] Ling W.C.T., "*Application of Probabilistic Network to Fire Protection*", Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley, 1982
64. [LØVÅS 93a] Løvås G.G., "*Modeling and Simulation of Pedestrian Traffic Flow*", March 1993, communication à paraître
65. [LØVÅS 93b] Løvås G.G., "*On Performance Measures for Evacuation Systems*", June 1993, communication à paraître
66. [MACGREGOR 82] MacGregor Smith J., "*An Analytical Queuing Network Computer Program for the Optimal Egress Problem*", Fire Technology, Vol.18, No.1, p.18-37, February 1982
67. [MACKINTOSH 75] Mackintosh E., West S. & Saegert S., "*Two Studies of Crowding in Urban Public Spaces*", Environment and Behavior", p.159-184, Vol.7, No.2, June 1975
68. [MAJOU 79a] Majou A.-M., "*Visibilité à travers la fumée*", Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Paris, septembre 1979
69. [MAJOU 79b] Majou A.-M., "*Application à la signalisation-incendie de données expérimentales de visibilité à travers la fumée*", Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Paris, octobre 1979
70. [MAJOU 85] Majou A.-M., "*Modèle simplifié de calcul de l'évacuation, par utilisation des escaliers, de bâtiments à plusieurs niveaux*", Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Paris, février 1985
71. [MELINEK 75] Melinek S.J. & Booth S., "*An Analysis of Evacuation Times and the Movement of Crowds in Buildings*", Building Research Establishment, Fire Research Station, CP 96/75, October 1975

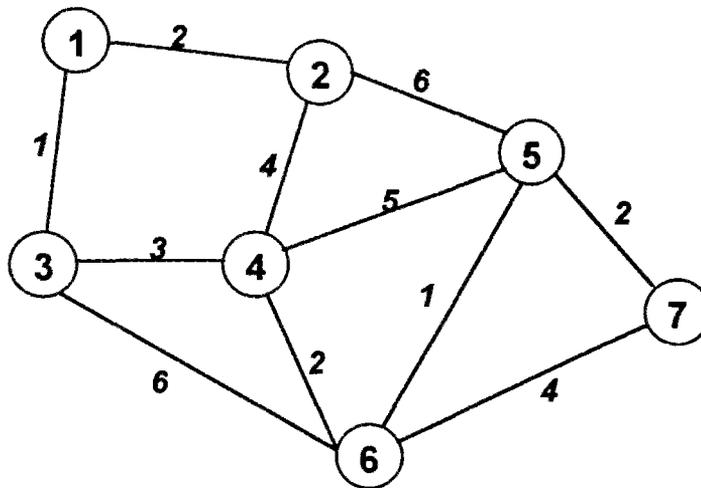
72. [NELSON 76] Nelson H.E., *"Directions to Improve Application of Systems Approach to Fire Protection Requirements"*, National Bureau of Standards, Proceedings of the 2nd Joint Panel Meeting of the 2nd UJNR Panel on Fire Research & Safety, Tokyo, 19-22 October 1976, p.119-151, produced by the Building Research Institute, Ministry of Construction, Japanese Government
73. [NELSON 83] Nelson H.E., Levin B.M., Shibe J.A., Groner N.E., Paulsen R.L., Alvord D.M., Thorne S.D., *"A Fire Safety Evaluation System for Board and Care Homes"*, National Bureau of Standards, March 1983 (ref. NBS : NBSIR 83-2659)
74. [NELSON 88] Nelson H.E. & MacLennan H.A., *"Emergency Movement"*, Sec. 2, Chap.6, *"The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering"*, National Fire Protection Association, Quincy, MA 02269, U.S.A., 1988 ISBN: 0-87765-353-4
75. [NOBER 81] Nober E.H. , Peirce H. & Well A. , *"Waking Effectiveness of Household Smoke and Fire Detection Devices"*, Fire Journal, p.86-92, July 1981
76. [OZEL 85] Ozel F., *"A Stochastic Computer Simulation of the Behavior of People in Fires: An Environmental Cognitive Approach"*, Proceedings of the International Conference on Building Use and Safety Technology, p.91-95, 1985
77. [PASSINI 84] Passini R., *"Wayfinding in Architecture"*, New York, 1984
78. [PAULS 80] Pauls J.L. & Jones B., *"Building Evacuation: Research Methods and Case Studies"*, in *"Fires and Human Behavior"*, p.227-249, D.Canter (ed.), J.Wiley & Sons , N.Y., 1980
79. [PAULS 82] Pauls J.L., *"Recherches sur le comportement humain dans l'incendie"*, Revue Generale de Securite, No.13, p.34-36, Avril 1982
80. [PAULS 84] Pauls J.L., *"The Movement of People in Buildings and Design Solutions for Means of Egress"*, Fire Technology, Vol.20, No.1, p.27-47, February 1984
81. [PAULS 87] Pauls J.L., *"Calculating Evacuation Times for Tall Buildings"*, Fire Safety Journal, Vol.12, No.3, p.213-236, December 1987 ISSN: 0379-7112
82. [PAULS 88] Pauls J.L., *"Movement of People"*, Sec. 1, Chap.15, *"The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering"*, National Fire Protection Association, Quincy, MA 02269, U.S.A., 1988 ISBN: 0-87765-353-4
83. [PREDECHENSKII 78] Predtechenskii V.M. & Milinskii A.I., *"Planning for Foot Traffic Flow in Buildings"*, Stroiizdat Publishers, Moscow 1969, Translated and published for the National Bureau of Standards, United States Department of Commerce, and the National Science Foundation, Washington, D.C., by Amerind Publishing Co. Pvt. Ltd., New Delhi 1978
84. [RBF 89] Revue Belge du Feu, *"Feux instructifs - Metro King's Cross à Londres"*, p.7-21, No.96, juin 1989
85. [SARRAT] Sarrat P., *"Etude de l'évacuation du public - Application à un centre commercial"*, Fédérations Nationales du Bâtiment et des Travaux Publics - Union Technique Interprofessionnelle, Direction de la Recherche
86. [SARRAT 83] Sarrat P., *"Historique des études concernant les mouvement de foule, les temps d'évacuation et le comportement humain"*, Revue Générale de Sécurité, No.29, p.33-37, décembre 1983

87. [SARRAT 85] Sarrat P., "Modélisation des mouvements de foule", Face au Risque, p.46-50, novembre 1985
88. [SHAVIT 78] Shavit G., "Evacuation: Testing the Effect of Voice-Message Formats", ASHRAE Journal, p.38-41, July 1978
89. [SIME 85] Sime J.D., "Movement Towards the Familiar: Person and Place Affiliation in a Fire Entrapment Setting", Environment and Behaviour, Vol.17, pp.697-724, 1985
90. [STAHL 79] Stahl F.I., "Final Report on the 'BFIRES/Version 1' Computer Simulation of Emergency Egress Behavior During Fires : Calibration and Analysis", National Bureau of Standards (N.B.S.), March 1979 (ref. NBS : NBSIR 79-1713)
91. [STAHL 80] Stahl F.I., "BFIRES/Version 2: Documentation of Program Modifications", National Bureau of Standards (N.B.S.), March 1980 (ref. NBS : NBSIR 79-1982)
92. [STAHL 82] Stahl F.I., "BFIRES-II: A Behavior Based Computer Simulation of Emergency", Fire Technology-N.F.P.A., Vol.18, No.1, p.49-65, February 1982
93. [SWARTZ 79] Swartz J.A., "Human Behavior in the Beverly Hills Fire", Fire Journal, p.73-75, May 1979
94. [TAKAHASHI 87] Takahashi K. & Tanaka T., "An Evacuation Model for the Use in Fire Safety Designing of Buildings", Building Research Institute of Japan, Proceedings of the 9th Joint Panel Meeting of the UJNR Panel on Fire Research & Safety, Norwood, Massachusetts, 4-8 May 1987, p.203-218, Produced by N.H.Jason, B.A.Houston, Center for Fire Research, National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce, April 1988 (ref. NBS : NBSIR 88-3753)
95. [WATANABE 82] Watanabe Y., "A Study on Sound Guidance for Evacuation - Effect of Megaphoned Evacuation Guidance in Smoke", Proceedings of the 6th Joint Panel Meeting of the UJNR Panel on Fire Research & Safety, Tokyo/Tsukuba, 10-14 May 1982, p.203-211, produced by the Building Research Institute, Ministry of Construction, Japanese Government
96. [WEISMAN 81] Weisman J., "Evaluating Architectural Legibility - Way-Finding in the Built Environment", Environment and Behavior, Vol.13, No.2, p.189-204, March 1981
97. [WOOD 72] Wood P.G., "The Behaviour of People in Fires", Fire Research Note No 953, Fire Research Station, Borehamwood, U.K., November 1972
98. [WOOD 79] Wood P.G., "Behaviour in Stress: People in Fires", Ph.D. Thesis, Loughborough University of Technology, England, 1979
99. [ZELTZER 85] Zeltzer E., "Etude des comportements humains en situation de sinistre (incendie)", Ministère de l'Intérieur et de la Décentralisation, mai 1985
100. [ZELTZER 86] Zeltzer E., "Seconde phase d'étude des comportements humains en situation de sinistre (incendie) - Rapport de la phase qualitative", Ministère de l'Intérieur, août 1986
101. [ZELTZER 87] Zeltzer E., "Troisième phase d'étude des comportements humains en situation de sinistre (incendie) - Rapport de la phase quantitative", Ministère de l'Intérieur, 1987
102. [ΦΡΑΝΤΖΕΣΚΑΚΗΣ 82] Φραντζεσκακης I.M. & Γιαννοπουλος Γ.Α., "Σχεδιασμος των μεταφορων και κυκλοφοριακη τεχνικη", Athènes, 1982

ANNEXE 1

EXEMPLE D'APPLICATION DE L'ALGORITHME DE DIJKSTRA

Sur l'exemple du réseau suivant, nous présentons le calcul des chemins optimaux depuis le noeud 1 vers tous les autres noeuds:



<i>Initialisations</i>				
<i>E2=</i> 2,3,4,5,6,7			<i>E1=</i>	
<i>Tableaux</i> <i>Provisoires</i>			<i>Tableaux</i> <i>définitifs</i>	
<i>Noeud</i>	<i>L</i>	<i>Père</i>	<i>L</i>	<i>Père</i>
1			0	X
2	2	1		
3	1	1		
4	∞	1		
5	∞	1		
6	∞	1		
7	∞	1		

A chaque itération nous allons effectuer les opérations suivantes:

1. Elire comme noeud "minimal", celui présentant la valeur de "L provisoire" la plus faible à la fin de l'itération précédente. Ce noeud est considéré "résolu" et est déplacé de l'ensemble E2 vers l'ensemble E1.

2. Pour tous les noeuds appartenant encore à E2, calculer la distance de chaque noeud, qui serait obtenue si l'on passait par le noeud minimal défini au pas précédent. Cette distance est égale au "L définitif" du noeud minimal, augmenté de la distance le séparant du noeud examiné. Elle est comparée au "L provisoire" précédent du noeud en question: la valeur la plus faible est retenue comme nouvel "L provisoire".

<i>Itération No. 1</i>							
<i>Noeud minimal = 3 (L=1)</i>			<i>E2= 2,4,5,6,7</i>			<i>E1= 1,3</i>	
<i>Anciens Tableaux Provisoires</i>		<i>L en passant par le noeud minimal</i>	<i>Nouveaux Tableaux Provisoires</i>		<i>Tableaux définitifs</i>		
<i>Noeud</i>	<i>L</i>	<i>Père</i>	<i>L</i>	<i>L</i>	<i>Père</i>	<i>L</i>	<i>Père</i>
1						0	X
2	2	1	∞	2	1		
3						1	1
4	∞	1	4	4	3		
5	∞	1	∞	∞	1		
6	∞	1	7	7	3		
7	∞	1	∞	∞	1		

Nous venons donc d'établir que le chemin le plus court entre les noeuds 1 et 3 est l'arc reliant directement ces deux noeuds.

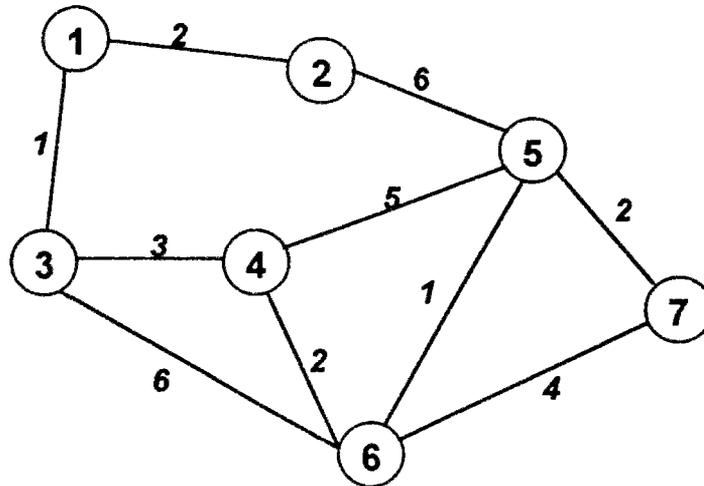
<i>Itération No. 2</i>							
Noeud minimal =		2 (L=2)		E2= 4,5,6,7		E1= 1,2,3	
Anciens Tableaux Provisoires		L en passant par le noeud minimal		Nouveaux Tableaux Provisoires		Tableaux définitifs	
Noeud	L	Père	L	L	Père	L	Père
1						0	X
2						2	1
3						1	1
4	4	3	6	4	3		
5	∞	1	8	8	2		
6	7	3	∞	7	3		
7	∞	1	∞	∞	1		

De même, nous venons d'établir que le chemin le plus court entre les noeuds 1 et 2 est l'arc reliant directement ces deux noeuds.

<i>Itération No. 3</i>							
Noeud minimal =		4 (L=4)		E2= 5,6,7		E1= 1,2,3,4	
Anciens Tableaux Provisoires		L en passant par le noeud minimal		Nouveaux Tableaux Provisoires		Tableaux définitifs	
Noeud	L	Père	L	L	Père	L	Père
1						0	X
2						2	1
3						1	1
4						4	3
5	8	2	9	8	2		
6	7	3	6	6	4		
7	∞	1	∞	∞	1		

Cette itération montre que le chemin le plus court pour atteindre le noeud 4 depuis le noeud 1 consiste à passer par le noeud 3. A ce stade, toute se passe comme si l'arc

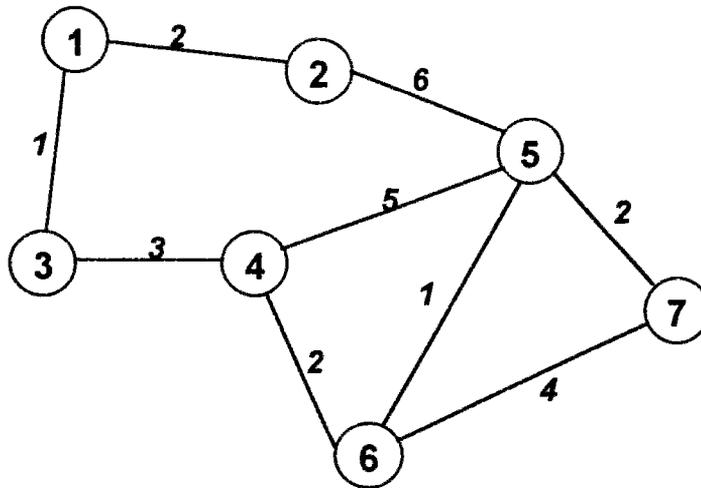
reliant les noeuds 2 et 4 disparaissait (sans que ceci soit introduit explicitement), puisqu'il n'est utilisé ni pour atteindre le noeud 2, ni pour atteindre le noeud 4:



Ceci illustre le principe de minimalité de Bellman selon lequel un chemin optimal est composé d'une suite de sous-chemins optimaux.

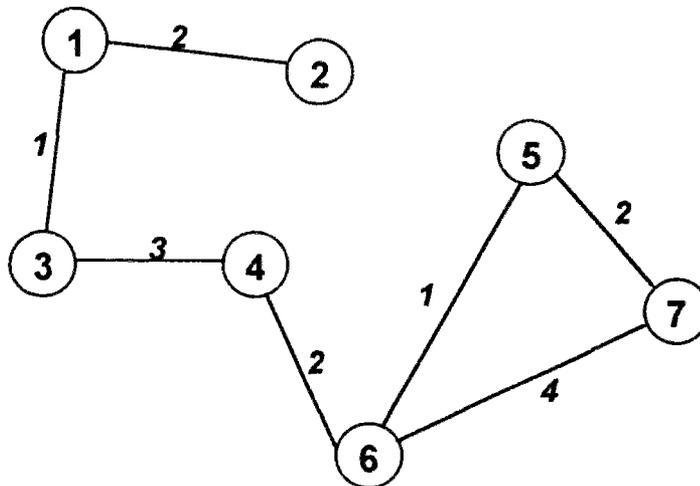
<i>Itération No. 4</i>							
<i>Noeud minimal =</i>		6 <i>(L=6)</i>		<i>E2=</i> 5,7		<i>E1=</i> 1,2,3,4,6	
<i>Anciens Tableaux Provisoires</i>		<i>L en passant par le noeud minimal</i>		<i>Nouveaux Tableaux Provisoires</i>		<i>Tableaux définitifs</i>	
<i>Noeud</i>	<i>L</i>	<i>Père</i>	<i>L</i>	<i>L</i>	<i>Père</i>	<i>L</i>	<i>Père</i>
1						0	X
2						2	1
3						1	1
4						4	3
5	8	2	7	7	6		
6						6	4
7	∞	1	10	10	6		

De même, l'arc (3,6) disparaît:



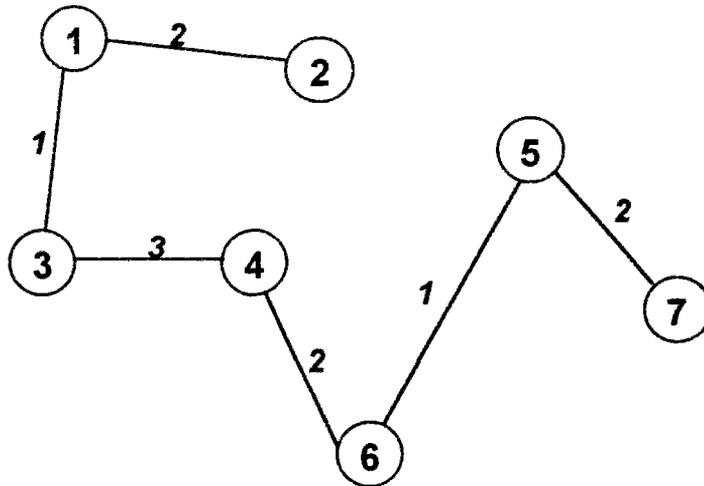
<i>Itération No. 5</i>							
<i>Noeud minimal =</i>		<i>5 (L=7)</i>		<i>E2= 7</i>		<i>E1= 1,2,3,4,5,6</i>	
<i>Anciens Tableaux Provisoires</i>		<i>L en passant par le noeud minimal</i>		<i>Nouveaux Tableaux Provisoires</i>		<i>Tableaux définitifs</i>	
<i>Noeud</i>	<i>L</i>	<i>Père</i>	<i>L</i>	<i>L</i>	<i>Père</i>	<i>L</i>	<i>Père</i>
<i>1</i>						<i>0</i>	<i>X</i>
<i>2</i>						<i>2</i>	<i>1</i>
<i>3</i>						<i>1</i>	<i>1</i>
<i>4</i>						<i>4</i>	<i>3</i>
<i>5</i>						<i>7</i>	<i>6</i>
<i>6</i>						<i>6</i>	<i>4</i>
<i>7</i>	<i>10</i>	<i>6</i>	<i>9</i>	<i>9</i>	<i>5</i>		

Les arcs (2,5) et (4,5) disparaissent:



<i>Itération No. 6</i>							
<i>Noeud minimal =</i>		<i>7 (L=9)</i>		<i>E2= ∅</i>		<i>E1= 1,2,3,4,5,6,7</i>	
<i>Anciens Tableaux Provisoires</i>		<i>L en passant par le noeud minimal</i>		<i>Nouveaux Tableaux Provisoires</i>		<i>Tableaux définitifs</i>	
<i>Noeud</i>	<i>L</i>	<i>Père</i>	<i>L</i>	<i>L</i>	<i>Père</i>	<i>L</i>	<i>Père</i>
<i>1</i>						<i>0</i>	<i>X</i>
<i>2</i>						<i>2</i>	<i>1</i>
<i>3</i>						<i>1</i>	<i>1</i>
<i>4</i>						<i>4</i>	<i>3</i>
<i>5</i>						<i>7</i>	<i>6</i>
<i>6</i>						<i>6</i>	<i>4</i>
<i>7</i>						<i>9</i>	<i>5</i>

L'arc (6,7) disparaît:

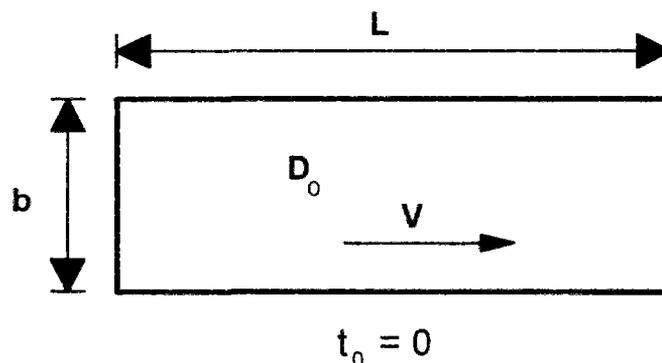


Nous voyons sur cet exemple qu'à partir du réseau initial, nous avons abouti à une arborescence ayant le noeud 1 pour racine.

ANNEXE 2

DISCUSSION SUR LES EFFETS INDUITS PAR LE CALCUL DE LA DENSITE PAR RAPPORT A LA SURFACE TOTALE DU LOCAL

Nous allons examiner dans cette annexe l'effet que peut avoir "l'approximation" adoptée dans plusieurs modèles, de rapporter la densité d'occupation à tout le local, plutôt qu'à l'aire réellement occupée par le "paquet" d'individus en mouvement. Nous allons comparer les résultats obtenus à l'aide de cette approximation, par rapport au calcul "exact".



Prenons l'exemple simple de l'évacuation d'un couloir avec les données suivantes:

$$L = 10 \text{ m}$$

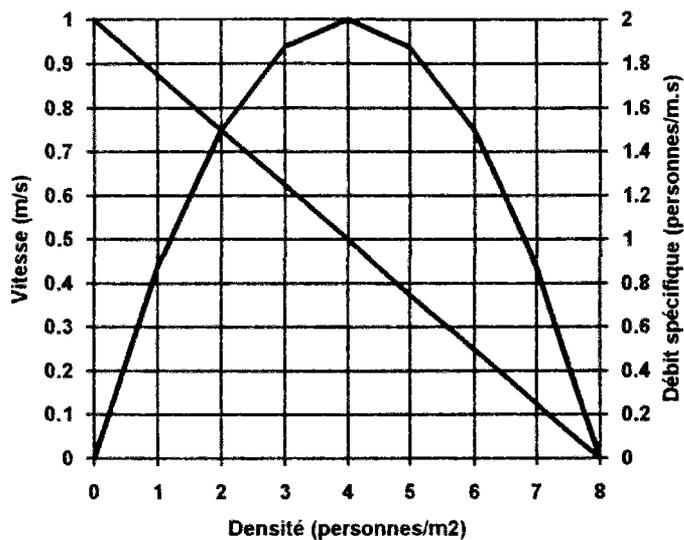
$$b = 3 \text{ m}$$

$$\left. \begin{array}{l} A = L \cdot b = 30 \text{ m}^2 \\ N = 120 \text{ personnes} \end{array} \right\} D_0 = \frac{N}{A} = 4 \text{ personnes/m}^2$$

Calcul 1: Nous allons en premier lieu utiliser la description du mouvement de foule proposée par Predtechenskii mais avec une loi vitesse-densité simplifiée, ainsi qu'avec une densité exprimée en unités classiques (personnes/m²), par exemple:

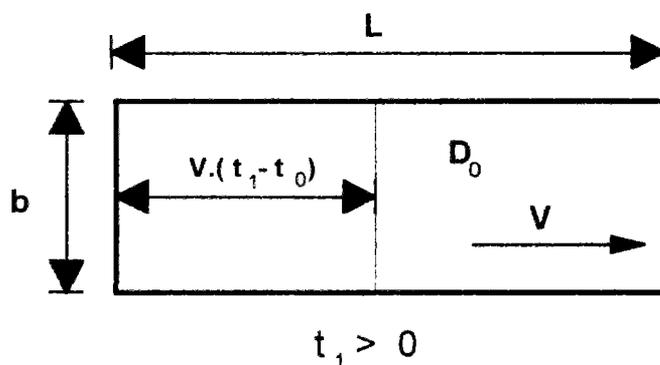
$$v = 1 - D/8 \quad (\text{m/s})$$

ce qui donne les courbes suivantes de vitesse et débit.



$$D_0 = 4 \text{ personnes} \cdot \text{m}^2 \Rightarrow v = 0,5 \text{ m/s}$$

D'après le modèle de Predtechenskii tout le paquet se déplace à vitesse et densité constante et uniforme vers la sortie. La situation à un instant entre l'instant initial et l'instant d'évacuation totale du couloir ressemble à celle-ci:



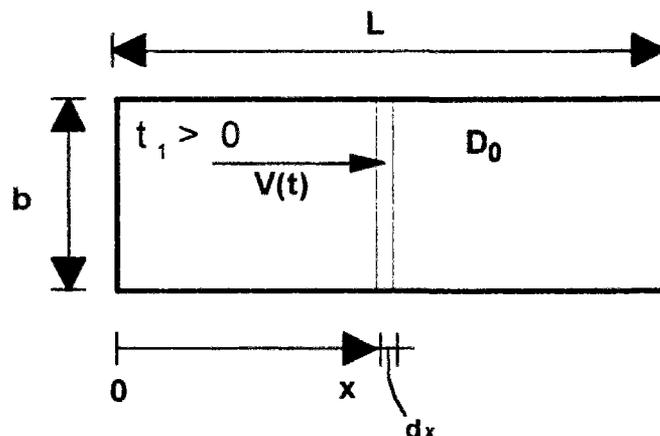
Le temps d'évacuation du couloir est le temps d'évacuation de la queue du "paquet":

$$T_1 = \frac{L}{v} = 20 \text{ s}$$

Plus généralement, dans la limite des hypothèses de cet exemple nous pouvons écrire:

$$T_1 = \frac{L}{1 - \frac{D_0}{8}}$$

Calcul 2: Effectuons à présent un calcul approché en supposant que la densité est rapportée à la surface totale du couloir. Cette hypothèse va entraîner une augmentation constante de la vitesse du "dernier" occupant, conséquence de la diminution de la densité avec le vidage du couloir. Calculons le temps nécessaire pour que le dernier occupant parcoure tout le couloir, en sachant que sa vitesse est variable¹:



Nous écrivons:

$$dx = v(t) \cdot dt$$

$$D(t) = \frac{(L - x(t))}{L} \cdot \frac{N}{A}$$

$$\text{Or: } v(t) = 1 - \frac{D(t)}{\delta} = 1 - \frac{N(L - x(t))}{\delta LA} \Rightarrow dx = \left(\frac{N}{\delta LA} (x(t) - L) + 1 \right) dt$$

$$\frac{dx}{x - L + \frac{\delta LA}{N}} = \frac{N}{\delta LA} dt \Rightarrow$$

$$\text{Donc: } x(t) = L - \frac{\delta LA}{N} + K \cdot e^{\frac{N}{\delta LA} t}$$

En introduisant la condition initiale:

$$t = 0, x = 0 \Rightarrow K = \frac{\delta LA}{N} - L$$

Donc:

$$x(t) = L \left(1 - \frac{\delta A}{N} \right) \left(1 - e^{\frac{N}{\delta LA} t} \right)$$

En résolvant pour $x = L$, on obtient:

$$T_2 = t_{x=L} = \frac{\delta LA}{N} \cdot \ln \left(1 - \frac{N}{N - \delta A} \right)$$

¹ En fait, il existe une autre façon de calculer le temps d'évacuation du couloir, plus cohérente avec l'hypothèse de calcul de la densité à partir de la surface totale du couloir: en écrivant le bilan sur le nombre d'évacués à partir du débit dans le couloir (vitesse x densité), variable avec le temps. Mais au cours du vidage du couloir, la densité moyenne diminue, entraînant une chute du débit en forme d'exponentielle tendant asymptotiquement vers 0, et le local n'est théoriquement jamais complètement évacué (problème de dilution) C'est exactement le problème qu'a rencontré Lardeux dans sa première approche par files d'attente en régime transitoire (voir p.119 de [LARDEUX 92]).

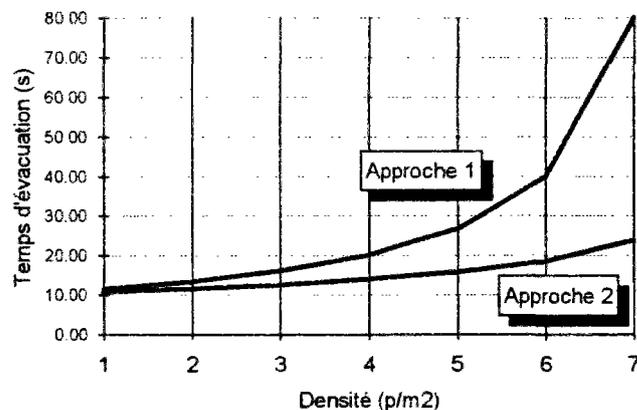


Fig. 1 - Temps d'évacuation du couloir en fonction de la densité initiale d'évacuation. Comparaison des deux approches de calcul de la densité. (Longueur de couloir = 10m)

Nous remarquons sur la figure précédente que si pour le calcul de la vitesse nous rapportons la densité à la surface totale du couloir, le temps d'évacuation varie relativement peu avec la densité initiale d'occupation.

Calculons à présent la vitesse:

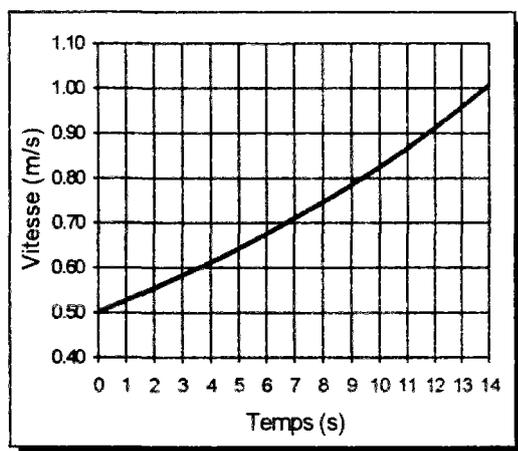
$$v(t) = x'(t) = \left(1 - \frac{N}{8A}\right) e^{\frac{N}{8LA}t}$$

Application numérique:

$$T_2 = 13,9 \text{ s}$$

au lieu de:

$$T_1 = 20 \text{ s}$$



La vitesse du dernier occupant dans la 2ème approche augmente presque linéairement, de 0,5m/s au début du couloir à 1m/s à la fin du mouvement, alors que dans la première approche elle était constante (0,5m/s). Par conséquent le débit unitaire d'évacuation du couloir ($q = v \cdot D$) passe de 2 à 4 personnes/m.s. Nous constatons donc qu'en fin d'évacuation, le débit est le double de la capacité spécifique (voir courbe au début de

l'annexe)².

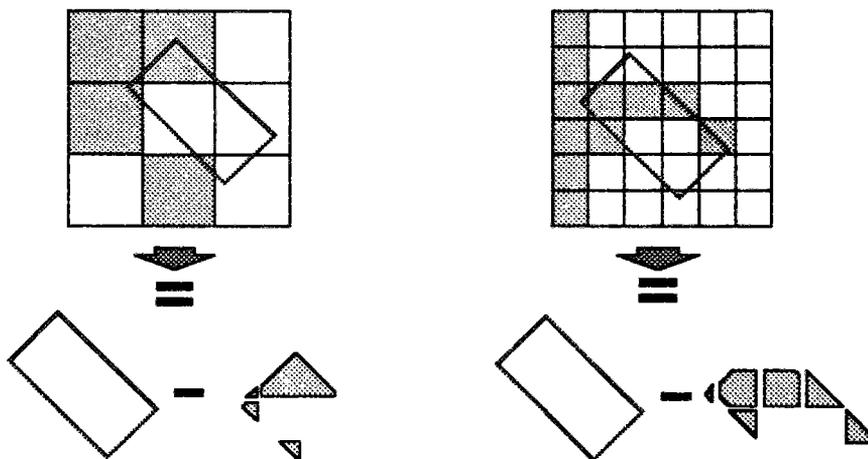
² Lardeux a effectivement constaté un tel dépassement du débit maximum dans son approche par files d'attente en régime stationnaire (voir p.103 & 107 de [LARDEUX 92]). L'auteur suppose que ce fait est à l'origine des résultats optimistes obtenus.

ANNEXE 3

CALCUL ANALYTIQUE DE LA SURFACE DU RECTANGLE D'INFLUENCE

Le problème consiste à calculer analytiquement l'aire nette du rectangle, c'est à dire après avoir retranché les portions appartenant à des cases-obstacles (cf. Chap. 6).

Les intersections rectangle-obstacles définissent des polygones de forme a priori complexe. Cependant, si nous examinons les intersections du rectangle avec *chacune* des cases-obstacles, nous observons que ces intersections forment toujours un polygone convexe.



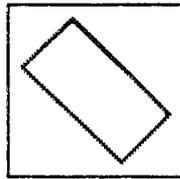
L'idée consiste à retrancher l'aire de ces polygones convexes de celle du rectangle.

Nous examinons une par une les cases-obstacles susceptibles de posséder une intersection avec le rectangle d'influence. La première phase concerne logiquement la recherche des sommets du polygone d'intersection. L'ensemble des sommets du polygone est formé par la réunion des sous-ensembles suivants, dont certains peuvent être vides:

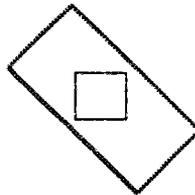
1. Intersections des côtés du rectangle avec les côtés de la case-obstacle. Ces intersections sont aisément calculables.
2. Sommets du rectangle inclus dans la case-obstacle. Le test d'inclusion est évident.

3. Sommets de la case-obstacle inclus dans le rectangle. Le test d'inclusion est le même que précédemment, mais après une transformation exprimant les coordonnées du sommet dans un système local par rapport au rectangle; dans ce système, les côtés du rectangle constituent des segments de droite horizontaux et verticaux.

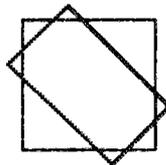
Si seul le deuxième ensemble n'est pas vide, alors le rectangle est totalement inclus dans la case, et cet ensemble doit comprendre les 4 sommets du rectangle. (Et inversement, si cet ensemble comporte 4 éléments, alors les autres ensembles doivent être vides):



Si seul le troisième ensemble n'est pas vide, alors la case est totalement incluse dans le rectangle, et cet ensemble doit comporter 4 éléments:



Enfin, il est possible que seul le premier ensemble ne soit pas vide:

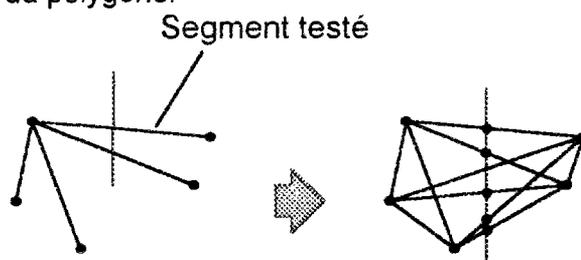


Le problème majeur pour appliquer par la suite une formule de calcul de l'aire du polygone réside au fait que les sommets dont nous disposons les coordonnées ne sont ordonnés; nous disposons d'une suite de points qui ne sont pas reliés, comme nous le montrons sur le schéma suivant représentant les sommets d'un polygone convexe:

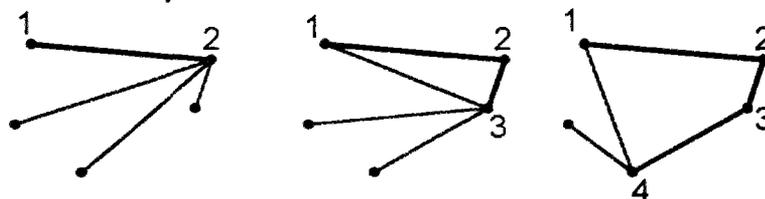


La procédure que nous utilisons pour identifier les côtés du polygône est la suivante:

- Nous choisissons au hasard un sommet de départ.
- A partir de ce sommet nous essayons de déterminer un des deux sommets voisins. Nous traçons un par un les segments reliant le sommet de départ aux autres sommets, jusqu'à ce que nous trouvions un sommet voisin.
- Le test utilisé pour déterminer si un segment constitue un côté du polygone, et non une diagonale, est le suivant: nous traçons la verticale passant par le milieu du segment testé, et déterminons les intersections éventuelles de cette verticale avec tous les segments reliant deux à deux les sommets du polygone. Si l'abscisse du milieu du segment constitue le maximum ou le minimum de l'ensemble des intersections de la verticale avec les segments, alors le segment testé est un côté du polygone.



- Nous répétons la procédure à partir du deuxième sommet ainsi identifié, en évitant de choisir les côtés déjà identifiés.



Le sommets du polygone étant ordonnés, nous utilisons la formule suivante pour le calcul de l'aire du polygone:

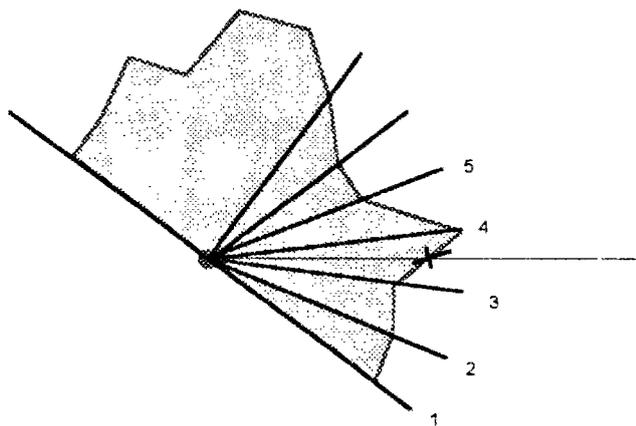
$$S = \frac{1}{2} \left| [(x_1 - x_2)(y_1 + y_2) + (x_2 - x_3)(y_2 + y_3) + \dots + (x_n - x_1)(y_n + y_1)] \right|$$

La valeur absolue est introduite afin de s'affranchir de l'obligation de respecter un sens précis de rotation.

ANNEXE 4

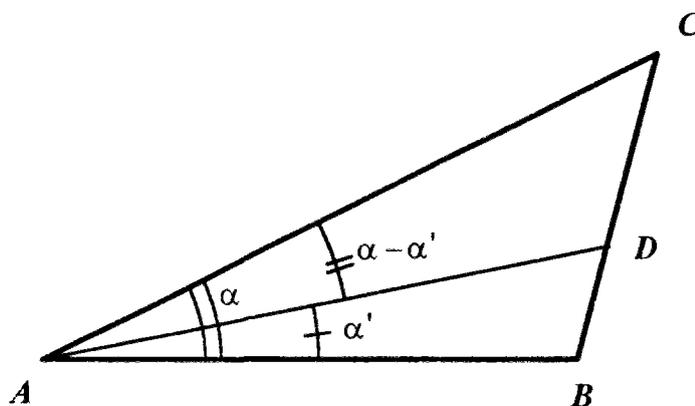
INTERPOLATION D'ANGLE

Le problème est le suivant (cf. Chapitre 6): quelle est la longueur du pas maximal pour un angle qui ne correspond à une des 13 directions principales de calcul de la zone accessible?



L'interpolation n'est pas linéaire; la solution présentée constitue une contribution de Xavier Bodart du Service Feu du CSTB.

Le problème est équivalent à la recherche de la longueur du segment AD sur la figure suivante.



Nous écrivons: $\frac{\sin \alpha}{AD} = \frac{\sin \alpha (BD + DC)}{BC \cdot AD} = \frac{\sin \alpha}{BC} \cdot \frac{BD}{AD} + \frac{\sin \alpha}{BC} \cdot \frac{DC}{AD}$ (1)

Remarquons (triangle ADB) que: $\frac{BD}{\sin \alpha'} = \frac{AD}{\sin \hat{B}} \Rightarrow \frac{BD}{AD} = \frac{\sin \alpha'}{\sin \hat{B}}$,
 mais (triangle ADC): $\frac{BC}{\sin \alpha} = \frac{AC}{\sin \hat{B}} \Rightarrow \frac{BD}{AD} = \frac{\sin \alpha'}{\sin \alpha} \frac{BC}{AC}$ (2)

De même (triangle ADC): $\frac{DC}{\sin (\alpha - \alpha')} = \frac{AD}{\sin \hat{C}} \Rightarrow \frac{DC}{AD} = \frac{\sin (\alpha - \alpha')}{\sin \hat{C}}$,
 mais (triangle ADC): $\frac{BC}{\sin \alpha} = \frac{AB}{\sin \hat{C}} \Rightarrow \frac{DC}{AD} = \frac{\sin (\alpha - \alpha')}{\sin \alpha} \frac{BC}{AB}$ (3)

En combinant (1), (2) et (3): $\frac{\sin \alpha}{AD} = \frac{\sin \alpha'}{AC} + \frac{\sin (\alpha - \alpha')}{AB}$,

soit:

$$AD = \frac{AB \cdot AC \sin \alpha}{AB \sin \alpha' + AC \sin (\alpha - \alpha')}$$