Contribution à l'analyse systémique, à la modélisation de la production et du déplacement des poussières lors de la démolition par foudroyage

Arnaud Andlauer

▶ **To cite this version:**

Arnaud Andlauer. Contribution à l'analyse systémique, à la modélisation de la production et du déplacement des poussières lors de la démolition par foudroyage. Architecture, aménagement de l'espace. Université de Strasbourg, 2012. Français. NNT : 2012STRAD043 . tel-00874340

HAL Id: tel-00874340

https://theses.hal.science/tel-00874340

Submitted on 17 Oct 2013

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.

N° d'ordre :

École Doctorale Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur

UdS – INSA – ENGEES

THÈSE

présentée pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Strasbourg
Discipline : Mécanique
Spécialité Génie civil

par

Arnaud Andlauer

Contribution à l'analyse systémique, à la modélisation de la production et du déplacement des poussières lors de la démolition par foudroyage

Soutenue publiquement le 2 février 2012

Membres du jury

Directeur de thèse : M. Abdellah GHENAIM, Pr. INSA de Strasbourg
Co-Directeur de thèse : M. Jean-Bernard POULET, Pr. INSA de Strasbourg
Rapporteur externe : M. Raoul FRANCOIS, Pr. INSA de Toulouse
Rapporteur externe : M. Félix DARVE, Pr. INPG de Grenoble
Examinateur : M. Jean Marie REYNOUARD, Pr. INSA de Lyon
Examinateur : M. Yves REMOND, Pr. Université de Strasbourg
Examinateur : M. Abdelali TERFOUS, Mcf. INSA de Strasbourg

IMFSS **N° de l'Unité 7507**

TABLE DES MATIERES :

AVANT PROPOS **11**

RESUME **13**

INTRODUCTION **21**

INTRODUCTION 23

1 Généralités **23**

1.1 Démolition 23

1.2 Déroulement d'une opération de démolition : 26

2 Problématique **28**

PARTIE 1 : BIBLIOGRAPHIE **33**

BIBLIOGRAPHIE 35

1 Impact sanitaire écologique et économique des poussières de démolition **37**

1.1 Contexte 37

1.2 L'analyse des matériaux constitutifs du béton armé 37

1.3 L'analyse d'échantillons lors de catastrophes naturelles 41

1.4 Les Impacts sur l'environnement 42

1.5 Les impacts sanitaires 43

1.6 Impacts économiques 48

2 Traitement de l'information **49**

2.1 Corrélation d'images 49

2.2 Filtration, détection de contour : 56

2.3 Une vue : 58

2.4 Deux vues : 66

2.5 Méthode de reconstruction 3D 71

3 Modélisation d'un fluide chargé **73**

3.1 Equations de bilan 73

3.2 Équations de continuité 73

3.3 Bilan de quantité de mouvement 74

3.4 Résolution par une approche RANS : 74

3.5 La Turbulence 75

3.6 Expression de la vitesse d'une particule 78

3.7 Couche limite : 78

3.8 Absorption de la lumière par les aérosols : 80

4 Conclusion : **82**

PARTIE 2 : EXPERIMENTAL **85**

PROTOCOLE EXPERIMENTAL 86

1 Définition des types de mesures **88**

1.1 Contexte de la mesure 88

1.2 Objectifs de la mesure 89

1.3 Contraintes de la mesure 89

1.4 Choix du dispositif de mesure 91

1.5 Conclusion : 92

2 Protocole expérimental **93**

2.1 Protocole global 93

2.2 Protocole des prises d'échantillons pour la mesure de dépôts et de granulométrie 94

2.3 Protocole des mesures vidéo 95

2.4 Traitement de laboratoire 97

2.5 Estimation de la concentration à partir de la prise de vidéo. 99

3 Description des sites de mesures **101**

3.1 Mante la jolie 101

3.2 Dammarie les Lys 102

3.3 Mâcon 105

4 Conclusion : **108**

RESULTATS EXPERIMENTAUX 110

1 Mesures de prélèvement : **112**

1.1 Répartition du dépôt : 112

1.2 Granulométrie : 118
1.3 Analyse chimique : 119
2 Mesure vidéo : 121
2.1 Effondrement des bâtiments : 121
2.2 Dynamique du nuage 129
2.3 Forme générale du jet : 133
2.4 Mesure de concentration : 134
2.5 Structures turbulentes au cours du temps 136
2.6 Aspiration 136
2.7 Fluctuation de vitesse 140
3 3D 143
4 Discussion : 146
4.1 Etude globale du processus de démolition : 146
4.2 Dynamique du nuage 156
5 Conclusion : 161

PARTIE 3 : SIMULATION 162
SIMULATION NUMERIQUE 165
1 Description du Code Saturne : 167
1.1 Les niveaux d'utilisation du code : 167
1.2 Principes de résolution 168
2 Simulation 171
2.1 Description du domaine 171
2.2 Condition d'entrée de vitesse 171
2.3 Plan de simulation 175
3 Résultats 177
3.1 Cas d'un jet stationnaire. 177
3.2 Cas d'un jet à injection instationnaire 199
4 Conclusion 210

CONCLUSION 214
CONCLUSION 216

REFERENCES 222
REFERENCES 224

LISTE DES FIGURES :

Figure 1: faisceau granulométrique relevée sur le site de Dannemarie les Lys. 16
Figure 2 : Profil de dépôt sur différentes lignes partant du bâtiment sur le site de Dannemarie les Lys.....16
Figure 3 : Position du front du nuage au cours du temps 17
Figure 4 : Prédiction du dépôt total régional des particules dans les voies respiratoire chez l'homme en fonction de la taille des particules. La fraction déposée inclut la probabilité d'inhalation. Le sujet est considéré comme respirant majoritairement par la bouche (pointillés) ou le nez (ligne continue). [WIT05] 45
Figure 5 : zone d'étude sur l'image de référence (à gauche) et l'image déformée (à droite).....51
Figure 6 : Fonction de forme d'ordre 0 51
Figure 7 : fonction de forme d'ordre 1.....52
Figure 8 : Fonction de forme quadratique 52
Figure 9 : Différentes échelles utilisées lors de l'approche multi-échelle. 55
Figure 10: modèle sténopé 59
Figure 11: Les repères de la projection. 60
Figure 12: Diagramme du modèle projectif [COR05].....61
Figure 13: Exemple de distorsion 63
Figure 14: Exemple de rectification d'une image. 63
Figure 15: Exemple de distorsion radiale, x correspond à la position du pixel qui apparaît sur l'image, correspond à la position corrigée. 64
Figure 16: distorsion de décentrage 64
Figure 17: Distorsion prismatique. 65
Figure 18: Diagramme projectif complet 65
Figure 19 : effet de parallaxe.....67
Figure 20: contrainte épipolaire.....69
Figure 21: dispositif d'acquisition par vidéo haute vitesse 96
Figure 22: fenêtre d'ajustement des paramètres de rotation et de translation. 99
Figure 23: Principe de l'estimation de la concentration du nuage de particule..100
Figure 24 : Implantation des bâtiments, dispositif de protection, et de prise de vue pour le site de mante la jolie.....102
Figure 25 dispositif de protection et d'atténuation de poussière de Damarie-Les-Lys.....103
Figure 26: implantation des prises de mesure de prélèvement et de dépôt du site de Damarie-Les-Lys 104
Figure 27: position des différents bâtiments avec leur direction de chute pour le cas des basculements et positions des différents éléments de protection pour le site de Mâcon. 105
Figure 28: positions de zones de relevé en bleu et des caméras en rose. Site de Mâcon première année. 106
Figure 30: position des caméras haute vitesse en violet et à vitesse standard en bleu. Site de Mâcon deuxième année. 107

Figure 31: profils de dépôts en g/m^2 pour les différentes lignes de prélèvement du site de Dammarie-les-Lys 112
Figure 33 : répartition du nuage de particules autour du bâtiment au bout de 7 secondes 113
Figure 34 : interpolation RBF pour l'ensemble des points mesuré 115
Figure 36 : interpolation RBF avec un ajout de points 116
Figure 38: profils de dépôts en g/m^2 pour les différentes lignes de prélèvement du site de Mâcon 1 117
Figure 39 : Courbes granulométriques cumulées pour différents points de mesures du site de Dammarie-les-Lys 118
Figure 40 : distribution granulométrique des échantillons pour différents points de mesures. Site de Dammarie-les-Lys. 119
Figure 42 : résultat par analyse MEBX. Site de Dammarie-Les-Lys. 119
Figure 44 : fibres d'étringite. Site de Dammarie-Les-Lys. 120
Figure 46 : zones masquées par le nuage de particules et les fumées d'explosif. Site de Mante la Jolie. 121
Figure 47 : évolution de la hauteur des bâtiments au cours de leur effondrement 122
Figure 48 : évolution de l'écart de différents points du bâtiment 251 de Dammarie-les-Lys 124
Figure 49 : visualisation du champ de déplacement obtenu par corrélation d'images du bâtiment de Mâcon 2. Le champ de déplacement est uniforme. 125
Figure 50 : allure typique d'un tas (bâtiment 251 Dammarie-les-Lys) 126
Figure 51 : adimentionnalisation des courbes de positions des bâtiments 127
Figure 52: position successive du front du nuage pour 3 bâtiments, Mâcon 1, Mâcon2, et Damarie-Les-Lys 129
Figure 53: Adimensionnalisation des positions successives du front du nuage pour les 3 courbes de la Figure 52 130
Figure 54: hauteur du nuage de particules au cours du temps pour bâtiment K1 et Mante la Jolie. 130
Figure 55: position successive du point le plus haut du nuage de particule, à partir de la paroi de l'immeuble K1. 131
Figure 56 : Hauteur d'entrée du nuage relevé le long de la paroi de l'immeuble. 131
Figure 57: Evolution de la hauteur d'entrée retranchée de la hauteur supposée du tas. 132
Figure 58 : Forme latérale du jet à différentes distances. Site de Mante la Jolie. 133
Figure 59 : Forme Du jet vue de face à différents instants. Site de Mante la Jolie. 133
Figure 60 : Evolution des structures turbulentes au cours du temps. Site de Mâcon 2 136
Figure 61 : Profil d'aspiration à 0,5 D. Site de Mâcon 2. 137

Figure 62 : Profil d'aspiration à 0,6 D. Site de Mâcon 2. 137
Figure 63 : Profil d'aspiration à 0,7 D. Site de Mâcon 2. 138
Figure 64 : Profil d'aspiration à 0,8 D. Site de Mâcon 2. 138
Figure 65 : repère de disposition des sondes d'aspirations. 139
Figure 66 : Visualisation des fumées d'explosif aspiré et du bâtiment en cour d'effondrement à l'arrière plan. Site de mâcon 2. 140
Figure 67 : Relevé des fluctuations de vitesses. Site de Mâcon 1. 141
Figure 68 : Fenêtre d'ajustement des paramètres de la reconstruction 3D. Site de Mâcon 2. 144
Figure 69 : Reconstruction 3D du nuage de particules à 4 moments successif. Site de Mâcon 2. 145
Figure 70 : Répartition type du minage pour un immeuble de 16 étages. 146
Figure 71 : principe de la seconde hypothèse. 147
Figure 72 : Localisation de la déformation au cours de la démolition — zone grise. 148
Figure 73 : description des différents systèmes. 150
Figure 74 : Variation des différents termes connus du bilan d'énergie cinétique d'un bâtiment au cours de son effondrement. Mante la Jolie K1 151
Figure 75 : répartition des zones de déformation lors du processus de flambage. 153
Figure 76 : répartition granulométrique des particules créées. 155
Figure 77: Nuage revenant vers le bâtiment 158
Figure 78: mouvement global du jet. 158
Figure 79: sur la droite : coloration rose du nuage par de la terre 159
Figure 80: Les trois causes du mouvement du nuage de particules 160
Figure 81: Profil de la vitesse d'éjection. 172
Figure 83: Profil de vitesse corrigé par l'influence de l'aspiration. 173
Figure 85 : organisation globale de la simulation 176
Figure 87 : Structure au sein d'une étape 177
Figure 88 : Géométrie du jet stationnaire 178
Figure 89 : dimension du domaine instationnaire 178
Figure 90 : segments de discrétisation 178
Figure 91 : Regroupement des faces 179
Figure 92 : Discrétisation 179
Figure 93 : détaille du maillage, stationnaire 180
Figure 94 vue de la fenêtre de propriétés physiques 182
Figure 95 : Paramètres numériques 184
Figure 96 : Distribution globale de la vitesse 185
Figure 97 : Distribution de la vitesse dans la zone d'injection 186
Figure 98 : sens du repère 186
Figure 99 : lignes de traçage verticales 187
Figure 100 : lignes de traçage horizontales 187
Figure 101 : distribution globale de la composante horizontale 187
Figure 102 : Composante horizontale à 10 m du bâtiment 188

Figure 103 : Composante horizontale à 20 m du bâtiment 188
Figure 104 : Composante horizontale à 50 m du bâtiment 189
Figure 105 : Composante horizontale à 75 m du bâtiment 189
Figure 106 : Composante horizontale à 150 m du bâtiment.....190
Figure 107 : Composante horizontale à 3.5 m du sol 191
Figure 108 : Composante horizontale à 5 m du sol 191
Figure 109 : Composante horizontale à 10 m du sol.....191
Figure 110 : Composante horizontale à 20 m du sol.....192
Figure 111 : Distribution globale de la composante verticale de la vitesse 193
Figure 112 : Composante verticale à 10 m du bâtiment.....194
Figure 113 : Composante verticale à 20 m du bâtiment.....194
Figure 114 : Composante verticale à 50 m du bâtiment.....195
Figure 115 : Composante verticale à 75 m du bâtiment.....195
Figure 116 : Composante verticale à 150 m du bâtiment. 196
Figure 117 : Composante verticale à 3.5 m du sol.....196
Figure 118 : Composante verticale à 5 m du sol.....197
Figure 119 : Composante verticale à 10 m du sol.....197
Figure 120 : Composante verticale à 20 m du sol.....197
Figure 121 : regroupement des faces, instationnaire.....200
Figure 122 : détailles du maillage, instationnaire.....201
Figure 123 : maillage, instationnaire 201
Figure 124 : Temps initial.....205
Figure 125 : début de l'injection 1.....205
Figure 126 : début d'injection 2.....206
Figure 127 : Formation d'une couche limite.....206
Figure 128 : Constance de la vitesse 207
Figure 129 : avancement du nuage.....207
Figure 130 : Structure rotative.....208
Figure 131 : le flux à 50 m 208
Figure 132 : effet du mur 209
Figure 133 : Domaine de début 210
Figure 134 : Domaine révisé.....211

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau 1 : Caractéristiques du cordeau détonant. 25
Tableau 2 : Caractéristiques du Cisalex 25
Tableau 3: Principaux éléments des poussières 40
Tableau 4 :Teneurs (en %) en différents éléments de 3 échantillons de béton. 41
Tableau 5: Les différentes phases du déroulement d'un chantier 89
Tableau 6: Caractéristiques des bâtiments du site de mante la jolie 101
Tableau 7: Caractéristiques des bâtiments du site de Damarie-Les-Lys 102
Tableau 8: Caractéristiques des bâtiments du site de Mâcon 105
Tableau 9 : paramètres pour l'estimation du dépôt total 115
Tableau 10 : Classes granulométriques 118
Tableau 12 : hauteur des différents tas après l'effondrement des bâtiments 125
Tableau 13 : temps de chutes estimé 127
Tableau 14 : termes A et B correspondant à l'équation de mouvement Eq. 68 . 128
Tableau 15 : Evaluation de la concentration du nuage. Site de Mante la Jolie. 134
Tableau 16 : Position des sondes de mesures. Site de Mâcon 1. 141
Tableau 17 : Masse maximale de particules pouvant être produite en fonction de leur diamètre. 152
Tableau 18 : Conditions aux limites 182
Tableau 19 : Composante horizontale de vitesse en fonction de la hauteur 190
Tableau 20 : Composante horizontales de la vitesse en fonction de la distance au bâtiment 192
Tableau 21 : Composante horizontale de la vitesse en fonction de la distance au bâtiment 193
Tableau 22 : Composante verticale de la vitesse en fonction de la distance au bâtiment 198
Tableau 23 : Dimensions, cas instationnaire 199
Tableau 24 : Groupes de faces, cas instationnaire 199
Tableau 25 : Discrétisation, cas instationnaire 200
Tableau 26 : Conditions aux limites, cas instationnaire 202

Avant propos

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du programme de recherche « démolition durable » qui réunit l'INSA avec deux partenaires, la Région ALSACE et l'entreprise CARDEM.

La démolition est une des techniques du renouvellement urbain. Elle a ses justifications économique, et sociétale. L'approche environnementale, objet principale de cette recherche complétera utilement les deux précédentes approches développées par CARDEM.

Nous ne saurions trop remercier nos deux partenaires qui nous ont permis de défricher ce secteur du génie civil.

L'engagement de la région aux côtés de l'INSA est constant. La région ALSACE nous a permis de créer des compétences sur les stations d'épuration végétales, des prototypes de parking écologique, et pour cette nouvelle recherche, une base de données à la fois expérimentale et théorique.

C'est la région qui a largement contribué à nous doter en matériel expérimental et calculatoire.

L'entreprise CARDEM a accompagné cette recherche de manière constante. Les ingénieurs de CARDEM ont travaillé de manière pérenne en participant régulièrement aux réunions, en partageant leurs savoirs et en finançant l'ingénieur-thésard, des élèves ingénieurs en projet de fin d'études. Les qualités humaines de ses ingénieurs nous ont permis d'avoir un dialogue constructif malgré nos deux cultures d'entreprise.

L'INSA a participé au projet à travers sa puissance de travail et ses moyens matériels. Les professeurs, les thésards et élèves ingénieurs impliqués ont bénéficié pendant quatre ans de l'infrastructure de l'INSA et de l'appui des personnels administratifs.

La réussite d'un projet de recherche « université-entreprise » n'est jamais simple. Au « temps de la recherche » doit correspondre l' « efficacité industrielle ».

L'intégration de l'équipe INSA au sein du laboratoire Icube qui réunit l'UDS, le CNRS, l'INSA permettra à terme la valorisation de la totalité des investissements réalisés par nos partenaires à travers une mise en place de compétences élargies.

Je remercie l'ensemble du jury : M. Jean Marie REYNOUARD, Pr. INSA de Lyon (Examinateur et président du jury); M. Raoul FRANCOIS, Pr. INSA de Toulouse (rapporteur); M. Félix DARVE, Pr. INPG de Grenoble (rapporteur); M. Yves REMOND, Pr. IMFSS (Examinateur); M. Abdelali TERFOUS, Mc. INSA de Strasbourg (Examinateur); et suis particulièrement honoré par l'intérêt qu'ils ont

D'un point de vue personnel, je tiens à remercier tout particulièrement: ma compagne Fanny qui a su m'accompagner dans cette grande aventure ainsi que Lobo et Samael . Je tiens aussi à remercier Mr Jean Bernard Poulet initiateur du projet Mr abdelah Ghenaim, Mr Abdelali Terfous pour leurs conseils et leur expertise, l'ensemble du personnel de l'insa de Strasbourg, Mr David Romaric, Mr Allain Haseman, Mr Trond Sau, Mr Jean pierre Minier, Mr Kristmann, Mr Poulet Aulrélien, Mr Bur Nicolas, Mr Bentarzi Younes, Mme Sabat Mira, mes parents, Sirus , l'ensemble de ma famille et toutes les personnes que je n'ai pu citer.

Resumé

CONTRIBUTION A L'ANALYSE SYSTEMIQUE, A LA MODELISATION DE LA PRODUCTION ET DU DEPLACEMENT DES POUSSIERES LORS DE LA DEMOLITION PAR FOUDROYAGE.

La démolition des bâtiments par foudroyage est une technique devenue classique. Originellement, elle consistait à détruire successivement chaque étage jusqu'à ce que le bâtiment soit totalement détruit. Cette méthode a été remplacée par une méthode où seuls certains étages sont détruits, de sorte que le bâtiment soit mis en mouvement et détruit sous l'action conjointe de la force de la pesanteur et de l'affaiblissement de certains étages. Cependant, la maitrise de cette technique est basée sur des méthodes empiriques. Bien que le dimensionnement prenne en compte des principes théoriques, il est simplifié en une approche statique pondérée par des coefficients de sécurité définis par une méthode d'essais-erreurs. La méthode mise au point fonctionne de manière identique sur tout type de sol et sous-sol, ce qui montre ses limites.

La démolition génère des nuisances qui doivent être prises en compte, sous peine de rendre caduc ce type de démolition. Les principales nuisances générées par le foudroyage sont :

- les projections générées par l'explosion et la dislocation du bâtiment ;
- l'onde de surpression générée par l'explosif ;
- la vibration du sol induite par l'effondrement du bâtiment ;
- la création et la propagation d'un nuage de poussière.

Les deux premiers points sont maitrisés. En effet, un conditionnement des poteaux minés permet de limiter les projections à l'intérieur d'un périmètre proche du bâtiment (40 m). Dans le cas d'autres bâtiments trop proches, il est prévu de les recouvrir de textile afin d'empêcher les éléments projetés d'abimer le bâtiment. De plus, l'onde de pression est limitée par le séquençage de la mise à feu des explosifs. Ce séquençage garantit que 7 kg d'explosif maximum sont amorcés en même temps conformément à la norme en vigueur (mettre la référence de la norme).

En ce qui concerne les vibrations, aucune méthode n'existe pour les limiter. Seuls, des fossés creusés permettent de bénéficier d'un effet d'ombre vis-à-vis de certains bâtiments. Toutefois, leur intensité doit rester dans une fourchette fixée par la Loi.

Les nuisances générées par les poussières et les manières de les limiter commencent à être une question fréquemment posée. Dans le cadre de la destruction d'installation classée pour la protection de l'environnement, cette question devient critique, car ce nuage peut déplacer des particules nocives.

On peut voir en conséquence une action conjuguée du principe de précaution inscrit dans la constitution, du scandale de l'amiante et de diverses catastrophes écologiques.

Actuellement, aucune information sur les mécanismes de production ou sur les mécanismes de propagation des poussières n'a été élaborée. Suite à l'attentat du 11 septembre, quelques éléments sur les mécanismes d'effondrement des bâtiments ont été avancés, mais restent néanmoins rudimentaires et ne s'intéressent qu'au cas spécifique du World Trade Center.

Concernant les poussières, des tentatives visant à en limiter la propagation ont été testées, mais ces approches sont critiquables, car les énergies mises en œuvre sont trop faibles par rapport à l'énergie libérée par la démolition. Un bâtiment de 50 m de hauteur pesant environ 10 000 tonnes a une énergie potentielle de 2,5 109 joules. La démolition dure 3 à 4 secondes.

Les techniques actuelles de réduction des poussières ont une efficacité très réduite, voire symbolique. Le manque de connaissance sur le phénomène ne permet pas la détermination d'une approche adaptée.

La première partie de la thèse s'est intéressée aux conséquences anthropologiques des propagations de poussières. Bien que connues, elles sont mal évaluées. La complexité est liée aux grands nombres : de modes d'action (cutané, stomatologique, digestif, pulmonaire) possibles ; de composés présents dans les bâtiments. Les compétences nécessaires à leur évaluation fine relèvent du domaine médical. Toutefois, nous avons procédé à une revue des axes possibles.

Concernant la démolition, peu de travaux existent, seules des approches de déformations de poteaux ont été présentées dans le cas du World Trade Center [Bazant]. Par contre, la production et la propagation des poussières n'ont pas été étudiées. Il n'existe aucun protocole expérimental adapté aux mesures in situ, ni sur les manières d'analyse, ni sur l'écoulement.

Notre recherche s'est intéressée plus particulièrement à la qualification et à la modélisation de ce problème, en définissant les interactions entre l'effondrement du bâtiment, la production des poussières et la propagation du nuage.

Nous nous sommes attachés à :

- Identifier les différents éléments du problème et à définir l'interaction entre ces éléments ;

- Expliciter les raisons de la production de particules ;

- Définir les principales grandeurs du nuage afin de permettre une approche de la simulation du phénomène.

L'expérimentation in situ est basée sur des recueils d'échantillons et des mesures optiques 2D et 3D. En l'absence de protocole de mesure pour ce type de phénomène, nous avons dû concevoir une méthodologie permettant l'acquisition de données. Ce protocole concilie les exigences des analyses de mesure, les exigences de déroulement du chantier et les exigences légales de sécurité de ce type d'opérations.

Les prélèvements d'échantillons permettent de définir les profils et la granulométrie des dépôts. Ces éléments permettent d'évaluer la quantité de poussière produite. Les profils de dépôt permettent une validation du modèle numérique.

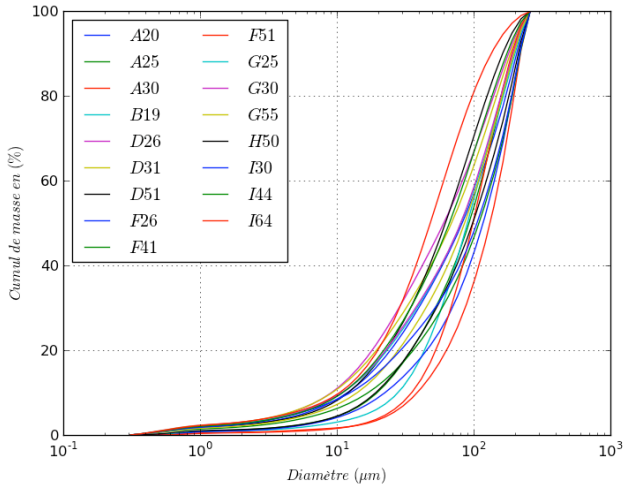


Figure 1: faisceau granulométrique relevé sur le site de Dannemarie les Lys.

La figure 2 représente les courbes granulométriques cumulées pour différents points relevés sur le site de Dannemarie les lys. Nous pouvons voir que l'étendue granulométrique est comprise entre 0,1 µm et 300 µm. Le d50 est compris dans une plage allant de 30 µm à 100 µm. Le fait que des particules de taille inférieure au micron se soient déposées nous indique que la concentration de ces particules dans l'écoulement est importante.

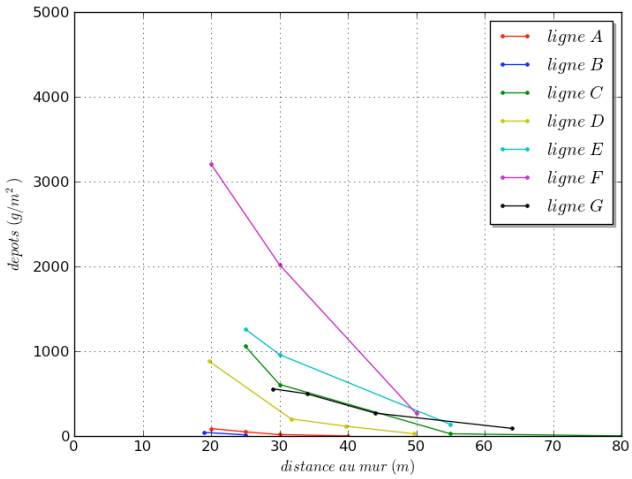


Figure 2 : Profil de dépôt sur différentes lignes partant du bâtiment sur le site de Dannemarie les Lys

La figure 3 nous présente quelques profils de dépôt pour des lignes partant d'un bâtiment, sur le site de Dannemarie les Lys. On peut remarquer que la quantité de dépôts est importante. Elle est de quelques kilogrammes par mètres carrés à une vingtaine de mètres du bâtiment. Ce dépôt est important en regard à la brièveté de la position du nuage de particules (quelques minutes). La décroissance du dépôt semble suivre une courbe en exponentielle.

Les mesures « vidéo » reposent sur l'analyse par corrélation d'images des films du phénomène. Dans un premier temps, les films étudiés étaient réalisés à une vitesse de 25 images par seconde. Or, la brièveté du phénomène nous a conduits à utiliser des caméras à hautes vitesses. En raison de la forme complexe du nuage et de la difficulté à trouver des points de prise de vue compatible avec une analyse 2D du phénomène, nous nous sommes orientés vers la mesure par vidéogramétrie.

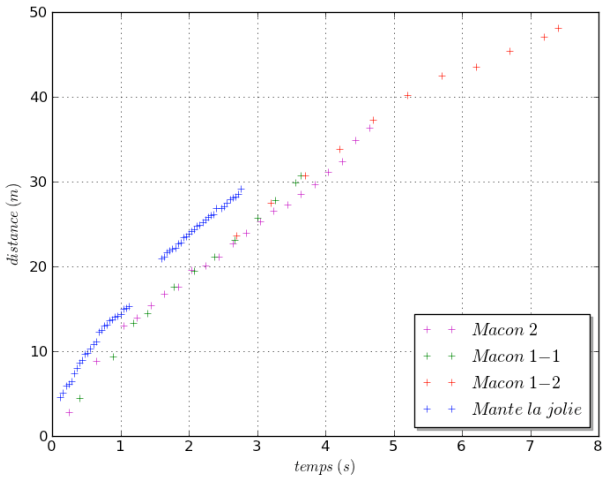


Figure 3 : Position du front du nuage au cours du temps

La figure 3 nous présente la progression du front du nuage au cours du temps. La distance a pour origine le mur extérieur du bâtiment. On peut distinguer 3 phases dans l'écoulement. La première entre 0 et 1s où le déplacement est très rapide. Ensuite entre 1 s et 5 s où le déplacement progresse linéairement et la dernière au-delà de 5 s où la vitesse du nuage ralentit fortement. C'est dans la dernière phase du nuage que se déroule le décollement, c'est aussi à partir de là que les structures turbulentes de l'écoulement ne sont plus entretenues. Ceci nous indique que l'injection du fluide porteur (au niveau du bâtiment) des particules a cessé.

La modélisation mathématique repose en premier lieu sur une analyse théorique du problème, puis sur l'adaptation et l'utilisation d'un code de calcul ouvert. Le code « saturne » choisi est implémenté sur un ordinateur multiprocesseur de 512 cœurs. La raison d'une telle puissance est justifiée par la taille des domaines étudiés. En effet, un bâtiment standard a une hauteur de 50 m, les vitesses du fluide se situent entre 15 et 25 m/s, la hauteur d'injection est de 10 m, ce qui donne un nombre Reynolds de 13 000. En prenant pour critère un nombre de mailles proportionnelles à Re9/4 [P. Chassaing] nous obtenons 2.109 mailles en 3D pour le cas d'une simulation numérique directe (si l'on considère le nombre de mailles et que les variables que nous calculons sont égales en taille aux nombres de bits du processeur on peut faire le calcul suivant :

- 13 variables en 32 bits par mailles

- 1000 itérations par pas de temps au minimum

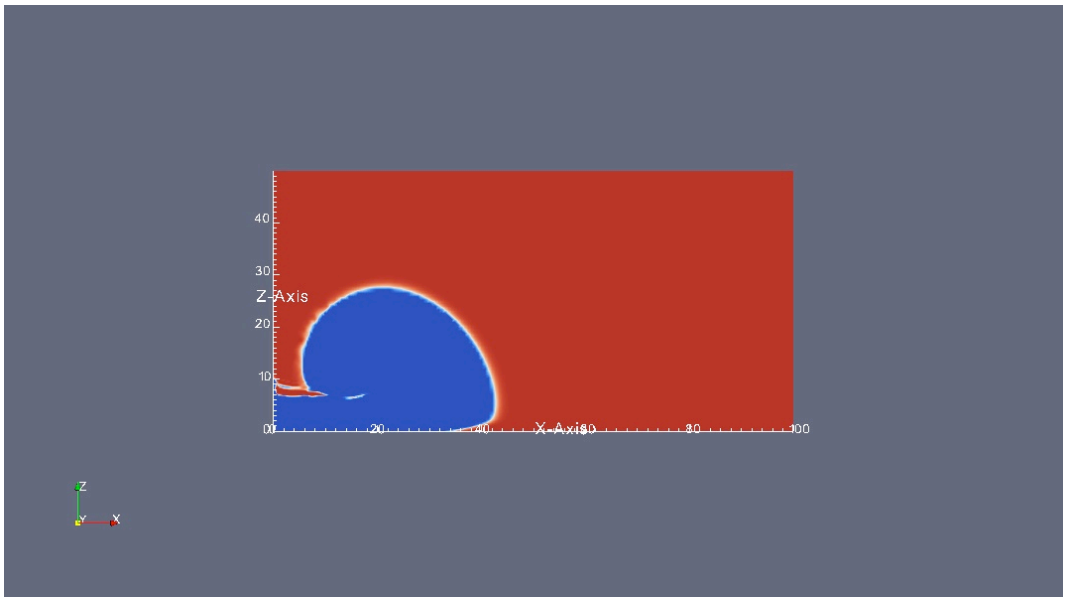
- un processeur pour faire une multiplication a besoin au moins de 1 coup d'horloge pour charger les données de 1 coup d'horloge pour faire le calcul et de 1 coup d'horloge pour le décharger. Mais comme les réseaux de communication n'arrivent pas à saturer le processeur, il faut en général 10 coups d'horloge pour une opération.

- Un processeur a 2Ghz en 32 bits

- 500 pas de temps

- Donc, on fait ((nombre de mailles * nombre de variables * 10)/ (cadence du processeur))* Nombre de pas de temps = 520 jours

- Et quand on a plusieurs processeurs on divise ce temps par Nombre de processeurs * 0,5, et là on a une approximation à peu près juste de la question , encore que le coefficient dépende du nombre processeur en gros plus on a de processeur moins bien ils travaillent entre eux.



Nos résultats ont permis de vérifier les premières hypothèses sur l'écoulement et en particulier de montrer l'interdépendance entre la création de particules, le mouvement du nuage et l'effondrement du bâtiment. Plus la vitesse d'effondrement du bâtiment est grande, plus les variations d'énergie cinétique sont importantes. Ces variations d'énergie cinétique sont en partie dues à la perte de masse du système, mais elles sont en partie absorbées par le processus de fracturation et de mise en mouvement du fluide. C'est ce mécanisme dissipatif qui crée les particules.

Ces mêmes résultats ont montré la limite des méthodes actuelles de dimensionnement des démolitions, et plus particulièrement :

- sur l'absence de données géotechniques et la non-prise en compte de la réaction du sol vis-à-vis de la déformation du bâtiment ;

- sur la non-maîtrise des scénarios d'explosion du foudroyage ;

- sur l'absence de données sur les transferts de charge au cours du processus de déformation dynamique du bâtiment.

En définitive, la maitrise de la propagation de particules passe par la maitrise du processus de démolition. Ce processus permet aujourd'hui des démolitions sur tout le territoire français. La géologie des sites est très différente pour chaque cas, la technique est alors sur dimensionnée. Une étude approfondie des mécanismes de déformation et de fracturation permettra une réduction significative de la charge d'explosif employé. De la même façon, la diminution de la vitesse de foudroyage permettra de réduire la production et la propagation des poussières. C'est alors que des systèmes annexes permettront de contenir convenablement ces particules.

INTRODUCTION

Introduction

1 Généralités

La raréfaction des espaces aménageables pour l'installation de constructions, d'ouvrages d'art, d'industries donne une place importante à l'activité de démolition. Elle permet de récupérer des infrastructures en fin de vie, ou devenue impropre à leur exploitation du fait de l'évolution des normes de constructions, des aménagements routiers, des modes de vie. C'est une activité qui permet à partir d'un espace aménagé d'obtenir un espace aménageable. Elle est le point de départ d'un nouveau projet. De plus, dans le cadre d'un projet d'aménagement public, la démolition à l'explosif porte le symbole de la volonté publique et est le point de départ d'un nouveau projet.

La démolition intègre le recyclage de matériaux. Les matériaux servent sous forme de remblais, de route, de matériaux granulaires qui entreront dans la composition de béton voir de parking vert.

Ce métier a beaucoup évolué avec le temps et, aujourd'hui, on parlera plutôt de déconstruction que de démolition. Son évolution est due d'une part aux projets technologiques et d'autre part aux avancées de la législation sur les conditions de travail. Aujourd'hui cette activité est fortement contrainte par l'environnement où elle s'effectue. Bien souvent elle se passe dans des zones urbaines à forte densité de population. Les scandales de l'amiante et le développement durable ont amené les différents acteurs à se poser des questions sur les impacts des chantiers de démolition sur les zones où elles sont conduites.

1.1 Démolition

Les principales techniques de démolition utilisées sont les démolitions mécaniques et à l'explosif. En raison de l'apparition de la technique du vérinage, nous proposons une nouvelle classification des méthodes, en partant du fait que les démolitions à l'explosif et le vérinage mettent le bâtiment en mouvement alors

que les démolitions mécaniques les découpent. Nous parlerons alors de démolition dynamique ou de démolition statique.

Les méthodes de démolition statique consistent dans l'emploi d'outils montés sur des engins de chantier pour démolir les structures d'une manière progressive en désolidarisant ses éléments.

Les démolitions dynamiques consistent à mettre le bâtiment en mouvement sous l'effet de la gravité afin de profiter de ce mouvement pour provoquer la dislocation. La mise en mouvement peut se faire en supprimant la totalité ou une partie des éléments assurant la descente de charge du bâtiment ou en découpant le bâtiment de sorte que sa structure se disloque.

Il existe deux grandes familles de démolition à l'explosif : le foudroyage intégral, qui consiste à détruire les étages inférieurs du bâtiment de sorte qu'il tombe sur lui-même et le basculement, qui consiste à faire une découpe en forme de biseau dans le bâtiment de sorte que le centre de gravité du bâtiment se retrouve dans le vide et tende à faire basculer le bâtiment.

Différentes combinaisons de ces méthodes peuvent être mises en œuvre suivant les contraintes du site. On parlera alors de méthodes mixtes ou semi-foudroyage. La méthode mixte la plus utilisée consiste en un foudroyage intégral orienté, par une action sur le déclenchement des charges, dans une direction de chute donnée.

Le vérinage consiste à déplacer la partie supérieure du bâtiment, de sorte que la descente de charge par les voiles et poteau ne soit plus assurée. La partie supérieure du bâtiment commencera alors sa chute. Comme la partie supérieure est décalée de la partie inférieure lors de la chute. Les poteaux, de la partie supérieure, rencontreront exclusivement les planchers de la partie inférieure.

Partant d'un bâtiment préalablement curé, le foudroyage consiste à miner un ensemble d'étages préalablement affaiblis, afin de minimiser la quantité d'explosif à employer. Dans notre cas, on désolidarise le bâtiment du sol, au niveau de ses premiers étages de sorte que l'ensemble du bâtiment restant viendra s'écraser sur le sol. D'autres étages sont partiellement détruits afin de favoriser la dislocation du bâtiment.

L'amorçage des charges se fait du bas vers le haut et du centre vers l'extérieur de sorte que le centre de l'étage supérieur soit détruit avant l'extérieur de l'étage inférieur, on parlera de dynamitage effectué sous forme d'une onde de cloche. Suivant que l'on cherche à faire prendre une inclinaison au bâtiment, on jouera sur l'enchaînement des explosions.

Deux types d'explosif sont utilisés pour la démolition. Ils sont dénommés cordeau détonant et cisalex.

Le cordeau détonnant est principalement constitué de pentrite, ou Tétranitrate de pentaérythritol. Il se présente sous la forme d'un cordon constitué d'une âme

de pentrite entouré d'un double tissage et d'un gainage de protection. Le tissage est fait en fils de polypropylène et le gainage est soit fait en PVC ou en polyéthylène basse densité extrudé.

Le téranitrate de pentaérythritol est un produit explosif répertorié dans l'inventaire européen des substances chimiques commerciales existantes au numéro 201-084-3. Les précautions d'usages sont définies par la directive 67/548/EEC. Ce produit est sensible au choc, frottement, fortes températures et aux décharges électrostatiques.

Énergie totale à l'explosion	5,8 MJ/kg
Volume de gaz produit	790 dm3/kg
Vitesse de détonation	8350 m/s
Masse molaire	316,14 g/mole
Masse volumique	1,77 g/cm3

Tableau 1 : Caractéristiques du cordeau détonant [COR10].

Le cisalex est un explosif nitraté allégé, appartenant à la famille des explosifs nitratés. Les explosifs nitratés sont constitués d'un mélange de nitrate d'ammonium (environ 80 % en masse) et d'un explosif pur (trinitrotoluène ou trinitrotoluène + pentrite)

Énergie total à l'explosion	3,37 MJ/kg
Volume de gaz produit	871 dm3/kg
Vitesse de détonation	4000 m/s
Masse molaire	Environ 115 g/mole

Tableau 2 : Caractéristiques du Cisalex [CIS10].

1.2 Déroulement d'une opération de démolition :

Quel que soit le choix de la technique de démolition, elle s'inscrit dans un processus qui se décompose de la manière suivante :

Une étude technique :

Elle a pour but de recueillir un certain nombre d'informations nécessaires d'une part à la bonne marche ultérieure du chantier et d'autre part à quantifier et qualifier l'ensemble des matériaux à traiter ainsi que l'ensemble des déchets.

Parmi les informations recueillies, on trouve :

- les différents plans du site (bâtiments, implantation des réseaux…) ;
- les échantillons des matériaux ;
- un état des lieux du site et un inventaire de ses éléments constitutifs.

Préparation du chantier :

Cette phase débute environ un mois avant le début des travaux. Elle a pour objectif de définir tous les éléments nécessaires au bon déroulement du chantier. Elle comprend :

- un ensemble de démarches administratives ;
- l'organisation du chantier, définition des moyens humain et matériel à mettre en œuvre, planification, budget ;
- évaluation des risques de pollution ;
- la définition de l'interaction du chantier dans le milieu urbain (flux de circulation) ;
- l'information et la sensibilisation des acteurs et des riverains sur l'hygiène, la sécurité et les conditions de travail.

Installation du chantier

Une fois la phase de préparation effectuée, le chantier pourra être installé. Il sera en priorité clôturé et une basse vie y sera installée. Les différentes activités visant à permettre la démolition du site pourront alors commencer.

Curage du bâtiment

Avant d'entamer la phase de démolition, il est nécessaire de préparer le bâtiment. C'est la phase de curage. Elle consiste d'une part à décontaminer le bâtiment des différents éléments nocif qui ont pu y être installé en procédant à un désamiantage, à l'enlèvement des transformateurs, des sources radioactives, des produits chimiques. Le bâtiment est ensuite nettoyé de tous ses déchets. Les éléments limitant la circulation des hommes et la manutention des déchets sont déposés (portes). D'autre part, la phase de curage consiste à déposer l'ensemble des éléments du second œuvre. Ces éléments sont classés par nature de déchet et

par partie d'ouvrage. Les éléments de couverture sont déposés à cette occasion. À la fin du curage, il ne reste plus que la superstructure du bâtiment, la phase de démolition peut commencer.

Démolition de la structure

Elle peut être manuelle, mécanique ou à l'explosif. Le choix d'une méthode dépendra de la hauteur du bâtiment, du type de structure, de la densité de construction, et de la sensibilité des structures avoisinantes. Il peut être nécessaire de procéder à un écrêtage des structures, de faire des saignées de désolidarisation en cas de conservation d'éléments mitoyens et même dans ce cas de procéder à des reprises de fondations.

Broyage

Une fois le bâtiment démolit les éléments au sol sont broyé pour permettre d'une part le tri de matériaux (béton et armatures métalliques) et d'autre part de préparer le béton au concassage.

Concassage

Le concassage peut se faire in situ ou dans un centre spécialisé. Il a pour but de finaliser le tri des matériaux (criblage) et de produire un matériau concassé à une certaine granulométrie pour être utilisé comme matière première pour des remblais de route ou comme élément granulaire de nouveau béton.

Remise en état du site

En dernier lieu, le site est remis en état pour permettre une nouvelle utilisation future. Cette phase consiste à remblayer le site et à évacuer le chantier.

2 Problématique

Le sujet de cette thèse est l'étude de la propagation des particules produites par la démolition de bâtiment à l'explosif en vue d'en limiter les impacts sanitaires écologiques et économiques.

Vu le contexte écologique et le principe de précaution inscrit dans la constitution. Il apparait qu'une réflexion sur les poussières de démolition, leurs impacts sur l'environnement et la santé, et les moyens de les diminuer est nécessaires. Le scandale de l'amiante a cristallisé les inquiétudes sur les poussières de silice. Ces inquiétudes sont relayées par des suspicions de danger pour le cas des nano particules. Au niveau des entreprises ces questions sont fondamentales, car elles conditionnent à ce jour l'accès aux marchés de déconstructions et modifient l'image de la profession dans son ensemble. Il apparaît, pour des risques avérés un coût pour ce secteur d'activité. Ces risques remettront en question certaines méthodes de démolition. Nous sommes dans une problématique de développement durable.

L'intérêt de ce sujet repose sur le fait que pour pouvoir limiter les effets des poussières de démolition il faut comprendre les différents mécanismes régissant le phénomène.

La difficulté du sujet provient essentiellement de la quasi-absence d'études. Il n'existe pas de méthodes de mesures adaptées à ce phénomène, ni aucune explication sur les raisons du déplacement de ces particules et aucune simulation numérique de ce phénomène. L'absence de données sur ce phénomène rend difficile le choix du matériel de mesure. Le contexte de la démolition demande à privilégier un matériel fiable et robuste. La fréquence faible des démolitions à l'explosif oblige à récupérer le plus d'informations possible sur un site donné. Une autre difficulté provient de la diversité des bâtiments démolis, ils n'ont pas les mêmes dimensions. Enfin, l'écoulement produit est en cour d'établissement, turbulent, instationnaire, et multiphasique. A priori, la phase portée est polydispersée et les concentrations très élevées. La rétroaction de la phase portée sur la turbulence rend complexe la modélisation.

Quelques études sur les mécanismes d'effondrement ont été conduites suite à l'attentat du 11 septembre et quelques études sur la composition des poussières ont été effectuées lors de graves catastrophes [BAZ07,GOT02]. Mais, ces études ne sont pas transposables à notre sujet du fait de leurs spécificités.

Dans le premier chapitre, nous présentons l'ensemble des connaissances utilisées dans cette thèse. Nous procédons aussi à une évaluation bibliographique des impacts sanitaires écologiques et économiques des poussières de démolition.

L'évaluation des impacts sanitaires, écologiques et économiques a été conduite en faisant une estimation des substances susceptibles d'être présentes dans les poussières de démolition, à partir de l'analyse du cycle de démolition. Estimation a été confrontée à des résultats d'analyses d'échantillons prélevés suite à des catastrophes telles que des tremblements de terre. À partir de cet échantillon de substances nous avons, en nous appuyant sur les connaissances scientifiques et les prescriptions légales, défini un ensemble d'impacts possibles, tant sur l'aspect sanitaire, écologique qu'économique.

L'ensemble des connaissances utilisées dans ce manuscrit s'articule autour du traitement de l'information (vision par ordinateur) et des écoulements multiphasiques.

Le traitement de l'information aborde successivement les questions :

- de la corrélation d'image, nécessaire pour déterminer le mouvement en 2D et apparier les points dans le cadre de la reconstruction 3D ;
- de la filtration d'image, pour améliorer les résultats de la corrélation ;
- de la transformation projective effectuée par une caméra ;
- de la relation entre deux points de prise de vue ;
- de la reconstruction 3D.

La modélisation d'un fluide chargé présente les bases de la simulation numérique, en faisant un rappel de la mise en équation d'un problème de dynamique des fluides, et la formulation du modèle k-ε. Puis il présente les connaissances nécessaires à l'analyse du phénomène, tel que :

- certaines caractéristiques de la turbulence qui permettent de déterminer des grandeurs nécessaires au calage du modèle de turbulence,
- la loi de mouvement d'une particule,
- les caractéristiques de la couche limite,
- les propriétés optiques des aérosols.

Le second chapitre aborde la question du protocole créé pour conduire les mesures sur site. Pour cela, dans un premier temps :

- nous nous sommes intéressés au contexte du chantier, en englobant l'environnement urbain,
- nous avons défini les objectifs des mesures,

- nous avons exposé les contraintes auxquelles devront s'adapter, aussi bien le protocole, que le matériel de mesure,
- puis en confrontant ces différents points, nous avons défini le dispositif de mesure.

Dans un second temps, nous exposons le protocole de mesure, en présentant :

- un protocole global permettant de définir les moyens à mettre en oeuvre pour la mesure ,
- un protocole lié aux mesures de prélèvement sur site,
- un protocole lié à la prise de vidéos,
- le traitement en laboratoire,
- les mesures de concentrations.

Dans un troisième temps, nous présenterons l'ensemble des sites des mesures présenté dans ce document, en décrivant leur instrumentation. Nous présenterons successivement le site de :

- Mante la jolie,
- Dammaries Les Lys,
- Mâcon.

Le troisième chapitre présente les résultats des différentes mesures conduites et les conclusions qu'elles ont entrainées :

- les résultats des mesures par prélèvement tels que : la répartition du dépôt, la granulométrie des particules et l'analyse chimique.
- Les différents résultats issus des mesures vidéo telles que :
    - la dynamique de chute des bâtiments, source du mouvement du nuage ;
    - la dynamique du mouvement du nuage ;
    - la forme générale du jet de particules ;
    - les mesures de concentrations ;
    - l'évolution des structures turbulentes au cours du temps ;
    - l'aspiration du bâtiment ;
    - les mesures de fluctuation de vitesses.

Puis nous exposerons les premiers résultats des mesures 3D, qui se restreignent pour le moment à une simple reconstruction 3D de la scène à différents instants.

Pour finir nous présenterons nos principales conclusions tant sur le processus global de démolition et ses liens avec la production de particules, que sur la dynamique du nuage et les raisons de son mouvement.

Le dernier chapitre représente une première exploitation des données et des analyses effectuées dans les précédents chapitres. Cette première approche permet de définir un certain nombre de points à approfondir. Il présente les différentes étapes de la simulation numérique de la propagation des particules générées par la démolition de bâtiment. Son enjeu est d'obtenir un modèle numérique du problème, suffisamment réaliste pour permettre une expérimentation numérique de solutions visant à contenir la dispersion des particules. La difficulté réside dans le fait de trouver une simplification du problème permettant de le traiter numériquement tout en gardant une bonne représentativité du problème.

Il commence par une description succincte de Code_Saturne. Qui est articulée autour des niveaux d'utilisation du code et des principes de résolution utilisée pour un modèle de type k-e.

Puis, il expose les principaux points de l'approche de simulation du problème. À savoir la manière dont le problème a été simplifié, en décrivant le domaine, les conditions de vitesse et le plan de simulation envisagé.

Pour finir, il expose les différents cas de simulations effectués tels que :

- le cas d'un jet stationnaire ;
- et instationnaire.

Pour chacun de ces cas, l'ensemble des conditions aux limites et des différentes variables a été exposé.

PARTIE 1 : BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

Sommaire

1 Impact sanitaire écologique et économique des poussières de démolition 37
1.1 Contexte ... 37
1.2 L'analyse des matériaux constitutifs du béton armé ... 37
1.3 L'analyse d'échantillons lors de catastrophes naturelles ... 41
1.4 Les Impacts sur l'environnement ... 42
1.5 Les impacts sanitaires ... 43
1.6 Impacts économiques ... 48
2 Traitement de l'information ... 49
2.1 Corrélation d'images ... 49
2.2 Filtration, détection de contour : ... 56
2.3 Une vue : ... 58
2.4 Deux vues : ... 66
2.5 Méthode de reconstruction 3D ... 71
3 Modélisation d'un fluide chargé ... 73
3.1 Equations de bilan ... 73
3.2 Équations de continuité ... 73
3.3 Bilan de quantité de mouvement ... 74
3.4 Résolution par une approche RANS : ... 74
3.5 La Turbulence ... 75
3.6 Expression de la vitesse d'une particule ... 78
3.7 Couche limite : ... 78
3.8 Absorption de la lumière par les aérosols : ... 80
4 Conclusion : ... 82

Cette partie bibliographique est la première des trois parties qui constitue l'enchainement de notre travail. Elle est la base nécessaire à la lecture de ce document. Elle est organisée suivant de deux axes.

Dans le premier axe, à partir de l'analyse du cycle de démolition, nous avons fait une estimation des substances susceptibles d'être présentes dans les poussières. Cette estimation a été confrontée à des résultats d'analyses d'échantillons prélevés suite à des catastrophes tels que des tremblements de terre. Une fois les substances déterminées, nous avons, en nous appuyant sur les connaissances scientifiques et les prescriptions légales, défini un ensemble d'impacts possibles.

Le second axe, quant à lui, présente l'ensemble des connaissances utilisées pour la mesure du phénomène, son analyse et sa simulation. Le traitement de l'information aborde les questions :

- de la corrélation d'image, nécessaire pour déterminer le mouvement en 2D et apparier les points dans le cadre de la reconstruction 3D ;
- de la filtration d'image, pour améliorer les résultats de la corrélation ;
- de la transformation projective effectuée par une caméra ;
- de la relation entre deux points de prise de vue ;
- de la reconstruction 3D.

La section sur la modélisation d'un fluide chargé présente dans un premier temps, les bases de la simulation numérique en faisant un rappel de la mise en équation d'un problème de dynamique des fluides, et la formulation du modèle k-ε car c'est ce modèle qui sera utilisé pour la simulation avec le code saturne. Dans un second temps, il présente des connaissances nécessaires à l'analyse du phénomène, tel que :

- certaines caractéristiques de la turbulence qui permettent de déterminer des grandeurs nécessaires au calage du modèle de turbulence ;
- ainsi que la loi de mouvement d'une particule, et les caractéristiques de la couche limite pour expliquer certains phénomènes.

1 Impact sanitaire écologique et économique des poussières de démolition

1.1 Contexte

Afin de faire un inventaire des substances susceptibles d'être présentes dans les poussières de démolition, il est nécessaire de connaître le processus de préparation d'un bâtiment avant sa démolition. Ce processus de préparation se déroule en 3 étapes.

La première est le curage du bâtiment. Le bâtiment est débarrassé de tout le second œuvre pour ne laisser que la structure porteuse du bâtiment. Cette étape est importante, car elle conditionne la possibilité de recycler les matériaux issus de la démolition. On retire notamment le plâtre, le bois, les fenêtres et l'amiante si le bâtiment en est pourvu.

Une fois le bâtiment curé vient la phase d'affaiblissement. Chaque étage miné est affaibli de manière à assurer la stabilité du bâtiment, mais sans considérer de surcharge. On détruit notamment les croix et les tés ainsi que la continuité de la cage d'ascenseur. Dans la structure porteuse restante sont percés des trous afin de pouvoir y loger les explosifs.

La dernière phase consiste à charger les étages affaiblis d'explosif et à connecter tous les détonateurs au séquenceur de démolition. L'ensemble des lignes de connexion est contrôlé afin d'éviter les incidents de tir.

À la fois pour des raisons de recyclages de matériaux et pour des raisons d'affaiblissement, il ne reste dans le bâtiment que la superstructure. Le principal matériau qui produira le nuage de particules sera donc le béton armé. C'est pourquoi, pour définir les impacts sanitaires et écologiques, nous nous sommes bornés au cas des matériaux présent dans le béton armé.

Le cas de l'accumulation des déjections animales sur la superstructure a été exclu de cette étude en raison de la proportion minime de fientes par rapport à la masse du bâtiment. Il est à noter toutefois que le contact avec des excréments peut entrainer des infections bactériennes, fongiques, virales, parasitaires et des maladies allergiques.

1.2 L'analyse des matériaux constitutifs du béton armé

Le béton armé est un matériau constitué d'une armature en acier noyé dans du béton. Le béton possède une bonne résistance à la compression, mais une mauvaise résistance à la traction. Les armatures en acier viennent pallier ce défaut.

Le béton est un matériau composite, constitué de granulats agglomérés par un liant. Le liant peut être hydraulique ou hydrocarboné. Dans notre cas, ce sont des bétons à base de liant hydraulique qui ont été utilisés pour la construction. La norme NF EN 206-1 classe les bétons en fonction de leur résistance caractéristique à la compression

L'acier utilisé pour les armatures est un alliage de fer et de carbone. Cet alliage possède une bonne résistance mécanique en traction et en compression. Le fer apporte une base de résistance importante et de la souplesse. La souplesse permet au matériau de se déformer notablement sans se rompre. Le carbone accroît de façon considérable la résistance de l'acier. La nuance de l'acier est donc le résultat d'un compromis entre la résistance et la souplesse

Selon la norme européenne NF EN 197-1 : « Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, mélangé avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau ». Il est composé essentiellement de clinker associé à des constituants secondaires (gypses, laitiers de haut fourneau, cendres volantes.). La norme EN 197-1 : 2000 classe les ciments en 5 catégories. Ces catégories définissent la proportion de mélanges de clinker avec des produits comme : les laitiers de haut fourneau, la fumée de silice, la Pouzzolane, les cendres volantes, les schistes argileux brulés et le calcaire.

Le clinker résulte de la cuisson d'un mélange composé d'environ 75 % de calcaire et de 25 % de silice. Le clinker se présente sous la forme de nodules durs et cristallisés, de teinte gris foncé pour les ciments habituels et verts pour le clinker de ciment blanc. La composition des clinkers gris est représentée par quatre grandes phases cristallines :

- Ca3Si : Silicate tricalcique (SiO2 – 3 CaO) : 50 à 65 % (Alite) ;
- Ca2Si : Silicate bicalcique (SiO2 – 2 CaO) : 15 à 20 % (Belite) ;
- Ca3Al : Aluminate tricalcique (Al2O3 – 3CaO) : 5 à 15 % (Aluminates) ;
- Ca4AlFe : Ferroaluminate tétracalcique (Al2O3 Fe2O3 – 4 CaO) : 5 à 10 % (Ferrite).

La composition minéralogique du clinker est fonction de la composition du mélange, de la température, du combustible utilisé, du temps de cuisson et des conditions de refroidissement.

Le ciment contient des silicates (SiO4)4- mais pas de silice libre. C'est le sable contenu dans le béton qui est à l'origine de l'exposition à la silice par les poussières de béton. Les teneurs en quartz des matériaux tels que béton, brique, mortier varient classiquement de 0 à 50 %.

La silice existe sous forme cristalline ou amorphe. Trois formes de silice cristalline sont présentes dans la nature : le quartz, la cristobalite et la tridymite. Le quartz est la forme la plus répandue (dans les granites, les sables, les quartzites, les céramiques…). La cristobalite et la tridymite sont rares à l'état naturel et se retrouvent dans les roches volcaniques et certaines météorites pierreuses.

Selon [MOU00], les concentrations en métaux lourds des ciments sont faibles, de 20 à 300 mg/kg pour les ciments industriels. Ces concentrations sont fonction de l'origine des matières premières, du type d'ajouts minéraux du ciment, des combustibles et des déchets ou sous-produits industriels valorisés dans le four cimentier. Les métaux présents dans les ciments industriels peuvent provenir de trois sources différentes :

la source « traditionnelle », du processus apporté par les matières premières minérales (calcaire, argiles, ajouts correctifs) et par les combustions fossiles utilisées pour le four cimentier ;

la source de métaux liée à la co-incinération de déchets de sous-produits industriels (pneus usagés, huiles, effluents industriels..) ;

La source de métaux provenant de constituants autres que le clinker, ajoutés dans les différents types de ciment.

La grande majorité des métaux proviennent du cru (matières premières minérales) ou des ajouts traditionnels utilisés dans les ciments à ajouts (cendres volantes d'incinération par exemple). On y retrouve en général les éléments suivants : Cr, Cu, Ni, Pb, V, Zn. Les matières premières apportent en moyenne entre 20 et 80 milligrammes de métaux lourds par kilogramme de ciment. Le mélange combustible (combustibles fossiles et parfois déchets industriels) apporte majoritairement nickel, vanadium et zinc.

Des traces de mercure, sélénium, bismuth, thallium ont également été détectées. Enfin, il faut préciser que certains métaux volatils (Hg, Se, Cd, Ti, Pb) sont entraînés par les gaz lors de la préparation du clinker (leur teneur dans le ciment obtenu s'en trouve donc diminuée).

Depuis 1996, ciment Calcia, a mis en place un suivi mensuel de différents éléments métalliques (Cd, Hg, Ti, As, Ni, Co, Se, Cr, Pb, Sb, Sn, V) dans ses ciments. La somme des teneurs en éléments métalliques Cr+Pb+V+Ni dans le ciment Portland pur (représentant les métaux toxiques détectables par les méthodes d'analyse de traces) est particulièrement surveillé, elle reste constante à environ 185 ppm sur la période janvier 1996-décembre 1999 [MOU00].

Les granulats utilisés pour le béton sont d'origine naturelle ou artificielle. Les granulats naturels, les plus utilisés pour le béton proviennent de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques telles que les quartz et quartzites, ou de roches éruptives telles que les basaltes les granites, les

porphyres. Indépendamment de leur origine minéralogique, on classe les granulats en deux catégories qui doivent être conformes à la norme NF EN 12-620 (granulats pour bétons) : les granulats alluvionnaires et les granulats de carrières. Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, les granulats utilisés pour le béton sont le plus souvent siliceux, calcaires ou silicocalcaires.

Parmi les granulats artificiels, on distingue quatre catégories. Les sous-produits industriels, les plus employés sont le laitier cristallisé concassé et le laitier granulé de haut fourneau obtenu par refroidissement à l'eau. Ils sont utilisés notamment dans les bétons routiers. Les différentes caractéristiques des granulats de laitier et leurs spécifications font l'objet des normes [NF P 18-302] et [NF P 18-306]. Les granulats à hautes caractéristiques, ils sont élaborés pour répondre à certains emplois, notamment pour les granulats très durs à renforcer la résistance à l'usure de dallages industriels (granulats ferreux, carborundum…) ou granulats réfractaires. Les granulats allégés par expansion ou frittage, les plus usuels sont l'argile ou le schiste expansé (norme [NF P 18-309]) et le laitier expansé [NF P 18-307]. Les granulats très légers, d'origine aussi bien végétale et organique que minérale (bois, polystyrène expansé). Très légers – 20 à 100 kg/m^3 – ils permettent de réaliser des bétons de masse volumique comprise entre 300 et 600 kg/m^3.

Cette analyse des éléments constituants des bâtiments montre que les poussières sont susceptibles de contenir une grande variété de composants. Le tableau suivant récapitule les principaux éléments.

Matière	***Constituants***
Acier	*Fe + C + (composant pour nuances)*
Ciment	*Silicates, Aluminates, ferroaluminates, Métaux lourds (Cd, Hg, Ti, As, Ni, Co, Se, Cr, Pb, Sb, Sn, V)*
Sable	*Quartz, cristobalite, tridymide*

Tableau 3: Principaux éléments des poussières

1.3 L'analyse d'échantillons lors de catastrophes naturelles

Lors du tremblement de terre dans la région du Grand Hanshin au Japon en 1995, des prélèvements de poussières de béton ont été effectués [GOT02]. La composition des 3 échantillons de poussières de béton (bétons classiquement utilisés pour la construction) étudiés était la suivante (en %) :

Substance	***Échantillon 1***	***Échantillon 2***	***Échantillon 3***
Silice	9,3	14,6	9,2
Soufre	0,7	1,6	0,8
Chlorine	0,13	0,05	0,06
Potassium	2,0	0,2	1,7
Calcium	45,0	33,7	47,7
Titanium	0,02	0,05	0,03
Manganèse	Nd	Nd	Nd
Fer	2,0	2,1	2,7
Zinc	0,23	Nd	Nd
Arsenic	Nd	Nd	Nd
Rubidium	Nd	Nd	Nd
Strontium	0,5	Nd	0,25
Zirconium	nd	Nd	Nd

Tableau 4 :Teneurs (en %) en différents éléments de 3 échantillons de béton.

1.4 Les Impacts sur l'environnement

1.4.1 À l'échelle globale

En 1995 [COL95] a montré que les particules pouvaient avoir une influence sur le bilan radiatif de l'atmosphère et donc jouer un rôle dans le changement climatique global. Les particules agissent de deux manières sur le bilan radiatif de l'atmosphère :

par un effet direct des aérosols qui dépend de leur quantité et de leurs propriétés optiques. Les aérosols diffusent la lumière solaire. Renvoyant ainsi une partie du rayonnement solaire vers l'espace. Ce rayonnement ne participera donc pas à l'effet de serre ;

par un effet indirect. Les aérosols servent de « noyaux de condensation » pour la formation des nuages. Dans une atmosphère fortement chargée en aérosols, une même quantité d'eau peut se répartir sur un plus grand nombre de gouttes, qui sont alors plus petites. Or, un nuage formé de petites gouttes plus nombreuses réfléchit plus le rayonnement solaire. Par ailleurs, on peut penser que les petites gouttes vont moins facilement conduire à des précipitations, induisant ainsi l'augmentation de la durée de vie du nuage. Les résultats de l'étude révèlent que ce sont essentiellement les activités humaines (aérosols d'origine anthropique provenant des pratiques agricoles, industrielles, domestiques et de transport) qui génèrent l'effet observé sur les nuages.

Ainsi, les particules atmosphériques exercent un forçage négatif sur le bilan radiatif de la Terre en diminuant l'apport global d'énergie solaire. Une fois émis dans l'atmosphère, les aérosols s'intègrent dans la circulation générale et peuvent être transportés sur des longues distances. Ils peuvent venir s'ajouter à la colonne d'eau océanique et sédimenter au fond des océans [CHE96] modifiant ainsi les cycles biogéochimiques de l'océan en limitant la productivité biologique [GUI97]. Des aérosols atmosphériques sont également retrouvés au niveau des pôles [PLA02], ce qui permet d'étudier l'impact global de l'homme sur son écosystème [DAV93].

Outre les rôles sur le forçage négatif du bilan radiatif de l'atmosphère, l'insertion des particules au sein des processus biogéochimiques océaniques, de contamination ou de fertilisation des sols, les aérosols sont aussi impliqués dans de nombreux processus de transformation atmosphérique à cause de l'interface qu'ils possèdent avec le gaz. Les grosses particules agissent sur l'atmosphère par une action catalytique et par l'adsorption et l'absorption des polluants gazeux [SEI86]. Les particules servent de véhicules aux éléments toxiques comme les métaux lourds ou les gaz s'adsorbant sur leur surface. Elles peuvent également contenir des métaux lourds à l'intérieur même de la structure cristalline des minéraux.

1.4.2 À l'échelle locale

Les aérosols sont la cause de la réduction de la visibilité dans les zones urbaines et industrielles à cause de la discontinuité de l'indice de réfraction à la surface de la particule ou à travers du gaz [SEI86]. De plus, les aérosols issus de la démolition contrôlée de bâtiments recouvrent des étendues importantes de végétation. Les poussières déposées sur les plantes les empêchent de respirer et peuvent causer leur mort progressive. A la longue, cela peut provoquer si la durée est assez importante, la disparition de toutes les espèces végétales avoisinantes [KHE09].

1.5 Les impacts sanitaires

Certains événements dans l'histoire ont fait prendre conscience des troubles de santé occasionnés par les aérosols atmosphériques. L'épisode de « smog » à Londres en 1952, qui fit 4000 morts en est un des plus célèbres.

Même si, pour le cas des poussières de démolition, l'accumulation de particules au cœur de l'appareil respiratoire semble être le phénomène le plus risqué pour la santé humaine, il ne faut pas pour autant en oublier les risques cutanés, les atteintes de la cavité buccale, et les risques liés à l'ingestion.

1.5.1 Cutané

On peut, à titre, de comparaison retenir le cas des effets sur la peau des poussières de ciment. Car d'une part la totalité du ciment n'aura pas forcément réagi lors de la prise du béton. Et d'autre part une partie, des atteintes cutanées sont dépendantes uniquement des composés du ciment et non de ses propriétés alcalines et hygroscopiques.

Selon le document pour le médecin du travail 64 (allergologie-dermatologies professionnelle) [INR01], le ciment est irritant du fait de ses propriétés alcalines, abrasive et hygroscopique. Le ciment sec n'entraîne que rarement des dermatites ; par contre mélangé à de l'eau, il libère de l'hydroxyde de calcium qui a pour conséquence d'augmenter le pH et ainsi de favoriser l'effet irritant. Le mélange de sable au ciment pour la fabrication des bétons le rend abrasif. L'effet hygroscopique est dû aux composants anhydres. Il entraine un dessèchement de la peau. D'autres facteurs d'irritation peuvent s'associer, pour le personnel exposé aux ciments : les traumatismes des machines, la manipulation des parpaings, le travail en milieu humide, l'agressivité des savons, les conditions climatiques, la macération sous les gants, le contact avec d'autres irritants [FRI07].

Le chrome hexavalent est la cause allergène la plus fréquente pour l'eczéma de contact lié à l'exposition au ciment [TUR93]. Le seuil de concentration nécessaire pour induire une sensibilisation cutanée est inconnu [AVN92]. Le cobalt est l'un des plus fréquents cosensibilisant associés à l'allergie aux chromates [CON95, OLS98].

Il est à noter que la sensibilisation aux chromates faciliterait la sensibilisation aux additifs du caoutchouc. Le caoutchouc est essentiellement présent dans les bottes et les gants portés par les personnelles [CON95].

1.5.2 Stomatologie

Selon [PEN05], l'accumulation de fines particules de tout matériau dur sur les faces occlusales des dents provoque une abrasion progressive de ces dernières. Pour les expositions à long terme, divers élément métallique, tels que le cuivre le fer le nickel le bismuth le chrome le plomb, le manganèse le cadmium l'étain le strontium et le mercure, provoquent différentes colorations des dents ou des gencives, mais aussi pour certain des ulcérations de la gencive et des déchaussements dentaires. Il est à noter que lorsque la muqueuse buccale est irritée, lésée ou traumatisée elle autorise les passages et la dissémination systémiques par voie sanguine des virus ou des bactéries.

1.5.3 Ingestion

L'ingestion de substances contenant des métaux lourds peut entrainer diverses intoxications, à condition que la dose ingérée soit suffisamment concentrée en élément nocif.

1.5.4 Respiratoire

L'inhalation d'un aérosol, et son dépôt dans différentes régions (voies aériennes supérieures, trachée, bronches, bronchioles respiratoires non ciliées et sacs alvéolaires) représentent potentiellement un risque pour la santé.

La probabilité de dépôt se réfère à la probabilité moyenne qu'a une particule inhalée d'un diamètre donné de se déposer à un endroit quelconque le long des voies respiratoires [WIT05]. Elle dépend de différents paramètres tels que les caractéristiques des particules, la vitesse et direction du vent, des paramètres anatomiques (calibres bronchiques, angles de ramification) ou physiologiques (fréquence respiratoire…)

Ce sont les poussières de diamètre inférieur à 10 µm qui pénètreront le plus profondément dans l'appareil respiratoire. Elles peuvent atteindre les alvéoles alors que les particules plus grosses sont retenues au niveau de la trachée ou des bronches.

On distingue 5 mécanismes de dépôt : la sédimentation, l'impaction inertielle, l'interception, la diffusion et l'attraction électrostatique lorsque les particules sont chargées. Ce dernier mécanisme est souvent négligé alors qu'il peut influencer de façon importante le dépôt pour les particules fortement chargées. Le caractère hydrophile d'une particule peut également affecter le dépôt en amplifiant l'impaction ou la sédimentation.

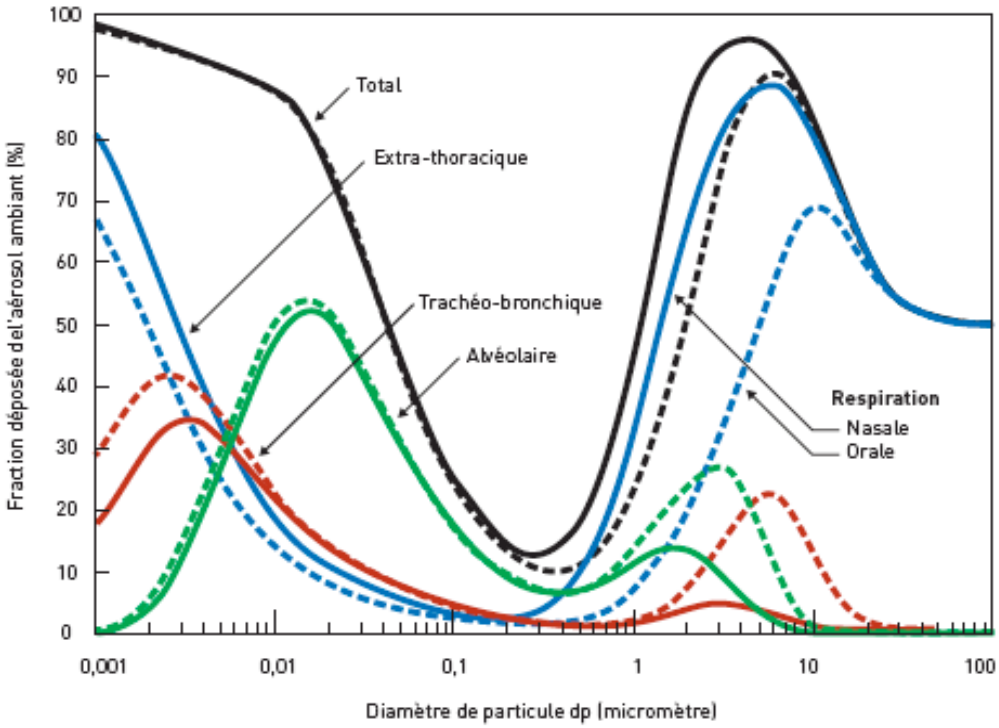


Figure 4 : Prédiction du dépôt total régional des particules dans les voies respiratoire chez l'homme en fonction de la taille des particules. La fraction déposée inclut la probabilité d'inhalation. Le sujet est considéré comme respirant majoritairement par la bouche (pointillés) ou le nez (ligne continue). [WIT05]

L'impaction et la sédimentation se produisent dans la région extrathoracique. En général, les particules dont le diamètre aérodynamique est compris entre 5 et 30 µm se déposent surtout par impaction dans la zone rhinopharyngienne (voies aériennes supérieures : nez, cavité nasale et gorge). Ce mécanisme est prédominant en raison de la grande vitesse de l'air et du grand nombre de changements de direction de l'écoulement de l'air dans les voies aériennes rhinopharyngiennes.

Les petites particules d'un diamètre aérodynamique d'environ 1 à 5 µm se déposent par sédimentation dans la zone trachéobronchique. La sédimentation est le mode de dépôt le plus commun parce qu'à ce niveau, la vitesse de l'air est suffisamment diminuée pour que les particules puissent se déposer.

La diffusion concerne les particules inférieures à 1 µm. Les particules comprises entre 0,3 et 0,5 µm sont trop petites pour subir l'impaction et la sédimentation, et trop grandes pour être influencées par la diffusion : elles connaissent donc une moindre déposition dans le tractus respiratoire. Lorsque l'air atteint la zone alvéolaire, sa vitesse est encore plus faible. Habituellement, seules les matières particulaires de 1 µm ou moins peuvent atteindre cette zone terminale des poumons. La plupart d'entre elles pénètrent dans les poumons en se posant au hasard sur la membrane alvéolaire ou dans d'autres parties des poumons.

Une fois déposées dans le tractus respiratoire, les particules vont subir divers mécanismes d'épuration, dont les plus actifs en fonction de la région de dépôt sont l'écoulement nasal (extrathoracique), la dissolution et le transfert des solutés dans le sang (toutes régions), le transport mucociliaire et la toux (trachéo-bronchique), l'endocytose par les macrophages et les cellules épithéliales (trachéo-bronchique et alvéolaire), l'évacuation vers l'interstitium (tissu conjonctif) pulmonaire et le transfert dans la lymphe (alvéolaire) [WIT05].

Le temps de séjour des particules dans les différents compartiments de l'appareil respiratoire dépend du site de dépôt ; pour la fraction thoracique, il est de l'ordre de quelques heures à quelques jours, alors que dans la région alvéolaire non ciliée, il se chiffre en mois voire en années.

Les composés particulaires solubles peuvent être transférés par le sang très rapidement vers les organes extra-pulmonaires. Le système lymphatique peut recevoir les particules insolubles inférieures à 2 µm et les particules solubles non transférées dans le sang. Ce mode d'élimination semble accru lorsque les autres mécanismes (macrophages, par exemple) sont saturés par une surcharge de particules. Le transfert vers le système lymphatique est long et l'élimination des particules par ce moyen l'est encore plus : les demi-vies sont estimées en décades. De ce fait, l'existence de réservoirs de particules susceptibles de relarguer lentement leurs composés toxiques dans l'organisme pourrait expliquer que le risque relatif associé à une exposition à long terme soit plus élevé que la simple somme des risques des effets d'expositions aiguës.

Plusieurs facteurs ont une influence sur les effets des particules inhalées, notamment certaines propriétés propres aux particules. En effet, la taille et le poids sont importants puisque les grosses particules plus lourdes se déposent plus rapidement. La composition chimique a aussi une grande importance. Par exemple, certaines substances, lorsqu'elles sont sous forme de particules, peuvent détruire les cils vibratiles qui permettent aux poumons d'expulser les particules. Le tabagisme notamment peut altérer cette capacité des poumons à se nettoyer eux-mêmes. Certains paramètres propres à la personne qui respire les particules peuvent aussi avoir des répercussions sur les effets de la poussière ; le rythme de la respiration et le tabagisme sont parmi les plus importantes. La déposition de poussières dans les poumons augmente en fonction de la profondeur de l'inspiration et du temps pendant lequel le souffle est retenu.

D'un point de vue général, il y a de nombreux types d'effets à court terme des PM_{10} pour lesquels des relations exposition-risque sont proposées : toux, bronchites chroniques, admissions hospitalières pour causes respiratoires, et même de mortalité [WIT05]. Selon [BRO97] la voie essentielle de pénétration de la silice dans l'organisme est la voie pulmonaire. Les particules s'y déposent et y persistent, si bien qu'une exposition unique à forte dose peut produire des effets durables. Les poussières de silice peuvent provoquer des irritations des yeux et du tractus pulmonaire. Mais aussi des atteintes pulmonaires avec la silicose, des

atteintes auto-immunes telles que la polyarthrite rhumatoïde, la sclérodermie généralisée [AOM91], et des cancers, car il existe un risque accru de cancers bronchopulmonaires parmi les sujets silicotiques. En 1996, la silice cristalline inhalée a été classée cancérogène pour l'homme par le CIRC.

Dans son étude sur les risques sanitaires et environnementaux liés aux démolitions d'installation nucléaire [DEL05] répertorie les VTR définis par différents organismes (OMS, US EPA,…) concernant les métaux lourds. Selon [le décret du 10 avril 1997 la concentration de l'atmosphère inhalée sur 8 heures ne doit pas dépasser pour le quartz 0,1mg/m^3 et pour la cristobalite et la tridymite 0,05mg/m^3. Dans ses Fiches toxicologiques, l'INRS propose des Valeurs limites d'exposition. L'OMS propose des valeurs guide pour l'exposition des populations aux particules urbaines. Ces valeurs sont pour les niveaux moyens annuels de 10 µg/m^3 pour les $PM_{2,5}$, et 20 µg/m^3 pour les PM_{10} et pour les niveaux moyens sur 24 h de 25 µg/m^3 pour les $PM_{2,5}$, et 50 µg/m^3 pour les PM_{10}. Le service toxicologique du centre Inter-Service de santé au travail a défini pour un chantier de démolition mécanique des niveaux d'exposition maximum à certains éléments constitutifs des bétons.

Le règlement européen [REG06], répertorie et classifie les substances et les mélanges en vue d'assurer un niveau élevé de protection de la santé humaine et de l'environnement, ainsi que la libre circulation des substances chimiques, des mélanges et de certains articles spécifiques, tout en améliorant la compétitivité et l'innovation. Son annexe I répertorie un ensemble de substances à partir de son numéro CAS (numéro d'enregistrement unique auprès de la banque de données de Chemical Abstracts Service). Toutes les substances répertoriées par le CAS ne sont pas répertoriées dans le présent règlement. À chaque substance répertoriée dans le règlement est attribué un numéro EINECS (Inventaire européen des Substances chimiques Commerciales Existantes). Il est indiqué pour chaque substance répertoriée si elle est nocive pour l'homme et, ou pour l'environnement.

L'ensemble de ces valeurs évolue avec le temps en fonction des avancées scientifiques sur le sujet. La règlementation acte au fur et à mesure ces valeurs. Il convient donc de vérifier auprès de différents acteurs (OMS, INRS…) et des différents textes règlementaires [REG06] en vigueur, ces valeurs.

À partir de ces valeurs, pour le cas des poussières de démolition, il convient de définir des scénarios d'exposition. Ces scénarios prendront en compte l'évolution de la concentration en poussière de démolition et la proportion en élément toxique des poussières. De là, à partir des valeurs limites d'exposition, il devient possible de quantifier la valeur de l'exposition maximum aux poussières de démolition, en prenant soin de considérer le cas des mélanges d'éléments nocif et des éventuels mécanismes de cosensibilisation qui pourraient abaisser les seuils de tolérance.

1.6 Impacts économiques

Les impacts économiques dépendent de trois facteurs :

- Le premier est le nettoyage des surfaces salies par le dépôt de particules ;
- Le second, plus difficile à évaluer, est l'impact sur l'image de l'entreprise. En effet les poussières ayant une mauvaise réputation, elles peuvent intervenir dans le choix de la démolition et de ses acteurs ;
- Le dernier est lié à la prise en charge des maladies professionnelles dues aux activités de démolition. Ce montant est évolutif en fonction de la prise en charge des maladies professionnelles. Les matrices emplois-expositions permettent d'évaluer la quantité de population exposée aux différents composants cités. Selon les statistiques de la CNAMTS pour l'année 2009, 277 nouveaux cas d'atteinte de pneumoconioses dus à l'inhalation de silice ont été recensés.

Au vu des différentes avancées sur le sujet, des soupçons sur la relation entre particules et cancer, on peut se demander si à terme, il ne se produira pas, pour les poussières, un scénario similaire à celui de l'amiante.

2 Traitement de l'information

2.1 Corrélation d'images

2.1.1 Histoire de la méthode :

Le flot optique correspond à la vitesse instantanée du mouvement apparent entre deux images. Il correspond aux variations de l'intensité lumineuse. La méthode d'estimation du flot optique proposée par Horn et Schunk [HOR81] a conduit à de multiples méthodes dérivées que l'on peut classer en quatre catégories principales [MON99] : les méthodes différentielles (MD), les méthodes de corrélation (MC), les méthodes spatio-temporelles basées sur l'énergie et celles basées sur des modèles paramétrés de mouvement.

Les méthodes différentielles sont fondées sur la conservation de la distribution de l'intensité E d'un point qui se déplace :

$$\frac{\partial I}{\partial t} + \nabla I.v = 0 \qquad \text{Eq. 1}$$

où $\vec{v}$ est le vecteur vitesse recherché. Cette équation (appelée *contrainte d'intensité* (CI)) repose sur deux hypothèses : *la conservation de l'intensité au cours du mouvement et un déplacement faible entre deux images consécutives de la séquence*. Il est préférable que les déplacements restent inférieurs au pixel pour que la différenciation ait un sens. Si l'on souhaite analyser des déplacements plus importants une approche multi résolution sera nécessaire.

Les méthodes basées sur l'énergie utilisent une famille de filtres spatiotemporels accordés sur certaines fréquences pour extraire l'information sur le mouvement. Leur principal problème est qu'elles utilisent un grand nombre d'images consécutives et ne sont applicables qu'à des mouvements de faibles amplitudes.

Les méthodes utilisant des modèles paramétrés s'appuient sur un modèle paramétré de mouvement. L'identification du mouvement se fait par le meilleur ajustement des paramètres du modèle. Le choix du modèle à utiliser nécessite une connaissance à priori de la nature des mouvements pour obtenir des résultats fiables.

Les méthodes de corrélations consistent à établir une correspondance entre deux images par la localisation d'un motif invariant. Elles permettent par l'utilisation d'analyse multiéchelles de définir des déplacements de grandes amplitudes, mais sont mises en échec sur les régions homogènes d'une image.

La corrélation d'image est une technique opérationnelle depuis les développements de la VIP (« Velocimétrie par Images de particules ») au cours des années 1970 en mécanique des fluides. La Laser Speckle Velocimetry a été inspirée de l'interférométrie de Spekle et a donné au cours des années 1980 la

VIP. La VIP donne accès à la vitesse du fluide en un très grand nombre de points, définissant ainsi le champ des vitesses du fluide.

La Corrélation d'Images est une méthode de mesure de champs non intrusive offrant l'accès aux champs de déplacements sur une surface. Elle est basée sur la comparaison de deux images, l'une dénommée image de référence, l'autre image déformée. Les hétérogénéités, naturelles ou artificielles, des textures de l'image observée, sont exploitées pour l'appariement de zones entre l'image de référence et l'image déformée. Ce qui permet d'analyser tout type de couple d'images pour peu que la texture soit suffisamment hétérogène. Le matériel nécessaire à sa mise en œuvre pratique ne requiert qu'une caméra CCD, une carte d'acquisition rapide et un micro-ordinateur. Elle ne donne accès qu'aux champs des déplacements dans le plan d'observation. Les autres grandeurs telles que la déformation, les lignes de courants sont obtenues par post traitement.

Elle peut être utilisée pour déterminer l'évolution d'un système au cours du temps ou dans le cas de techniques de photogrammétrie, pour apparier les points de deux images prises de deux points de vue [SUT00, CHA10]. C'est pourquoi elle se retrouve dans un nombre important d'applications tel que la météorologie [WU95], l'étude de la dynamique des fluides par PIV [LEC06], l'étude des matériaux et de leur déformation [AMA96, MGU97, MON96, VAC99, VAN09, CHE05], les activités biomédicales [MAI89, MON93, RUA93, GOR94], la vision tridimensionnelle...

2.1.2 Principe de la corrélation d'images :

Nous voulons déterminer le champ de déplacement qui s'est produit entre deux instants ou entre deux points de vue pour lesquels nous avons acquis une image. Pour cela nous devons être en mesure de résoudre le problème de l'appariement de points, ou mise en correspondance. Instinctivement, cette opération consiste à identifier un détail sur une image et à le rechercher sur une autre image. Une fois l'identification effectuée nous pouvons attribuer un déplacement à ce détail. Si cette opération est effectuée pour un ensemble de détail, nous sommes en mesure de déterminer un champ de déplacement pour cet ensemble discret de points [CLA03].

Le principe reste le même pour des images numériques. Choisissons deux images, l'une d'elles sera dénommée image de référence et l'autre sera nommée image déformée. L'objectif est d'apparier les points de l'image de référence avec les points de l'image déformée, c'est-à-dire identifier des détails d'une image sur une autre. Pour cela, choisissons un point de l'image de référence et autour de ce point définissons une zone centrée sur le point choisi, cette zone est appelée zone d'étude. La zone d'étude définit un motif, qui, sous la condition de ne pas être une zone de couleur uniforme, définit un détail quelconque, qui pourra être identifié sur l'image déformée. La corrélation permet d'apparier le motif de la zone d'étude, au motif d'une zone de taille identique sur l'image déformée. Il

s'agira donc de rechercher dans l'image déformée l'endroit où l'on atteint le maximum de vraisemblance entre les zones d'études des deux images.

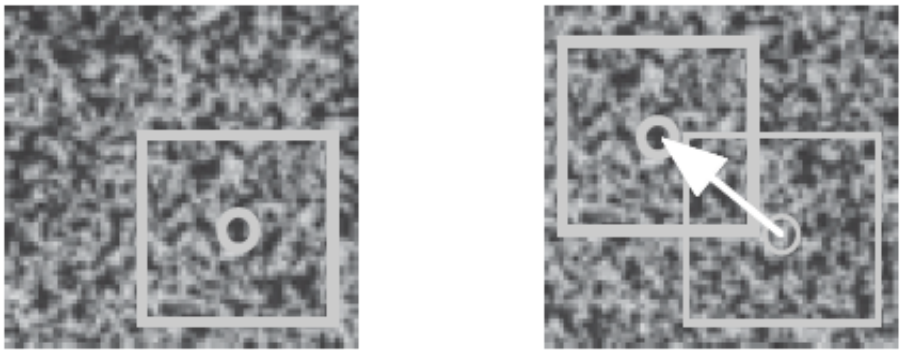


Figure 5 : zone d'étude sur l'image de référence (à gauche) et l'image déformée (à droite)

Chaque zone d'étude s'apparente à un signal bidimensionnel. En effet une image correspond aux variations de répartitions d'intensité lumineuse dans le plan observé. Le déplacement de la zone d'étude s'apparente donc à un décalage de signaux bidimensionnels. L'opération consiste donc à rechercher le maximum de vraisemblance entre deux signaux [CRO09].

2.1.3 Fonctions de formes :

Le déplacement de la zone d'étude est soumis à une transformation mécanique. Cette transformation mécanique peut être approximée par une fonction de forme [SCH02, FAZ09, TOK95, CHU85] qui relie les coordonnées de la zone d'étude dans l'image de référence aux coordonnées de cette zone dans l'image déformée.

Dans le cas de la corrélation d'image, il est courant d'utiliser une fonction de forme d'ordre 0 à deux coefficients. Dans ce cas, la transformation est rigide, et c'est une translation pure. Elle est utilisée dans les cas de faible rotation et de petites déformations.

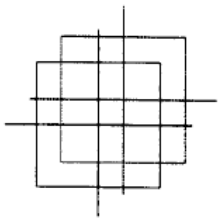


Figure 6 : Fonction de forme d'ordre 0

La fonction de forme peut aussi être définie à l'ordre 1. Elle sera alors appelée transformation affine (6 coefficients) ou bilinéaire (8 coefficients). Elle permet de traiter le cas des translations, des rotations et aussi de traiter les petits gradients de déformation.

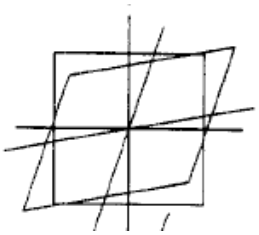


Figure 7 : fonction de forme d'ordre 1

A l'ordre 2, c'est une transformation quadratique à 12 coefficients ou biquadratique à 18 coefficients.

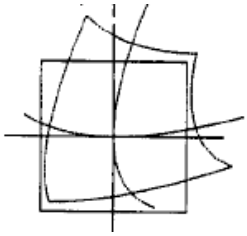


Figure 8 : Fonction de forme quadratique

2.1.4 Coefficients de corrélation :

Le coefficient de corrélation permet de définir la valeur des coefficients de la fonction de forme choisie. La valeur de ce coefficient correspond aux écarts des distributions de niveau de gris de la zone d'étude entre l'état initial et l'état déformé. Différentes définitions de ce coefficient existent [CHA03, FAZ09]. Ils peuvent être normalisés ou pas et utiliser les variations de niveau de gris plutôt que les niveaux de gris. Les coefficients les plus couramment rencontrés sont :

- La somme des différences au carré (Sum of Squared Difference) :

$$C_{SSD} = \left\langle (f-g)^2 \right\rangle \qquad \text{Eq. 2}$$

- La somme des différences au carré normalisée (Normalized Sum of Squared Differences) :

$$C_{NSSD} = \frac{\left\langle (f-g)^2 \right\rangle}{\sqrt{\left\langle f^2 \right\rangle}\sqrt{\left\langle g^2 \right\rangle}} \qquad \text{Eq. 3}$$

- La somme au carré normalisée centrée (Zero mean Normalized Sum of Squared Differences) :

$$C_{ZNSSD} = \frac{\left\langle \left(\left(f-\overline{f}\right) - \left(g-\overline{g}\right) \right)^2 \right\rangle}{\sqrt{\left\langle \left(f-\overline{f}\right)^2 \right\rangle}\sqrt{\left\langle \left(g-\overline{g}\right)^2 \right\rangle}} \qquad \text{Eq. 4}$$

- La fonction d'autocorrélation normalisée (Normalised Cross-Correlation) :

$$C_{NCC} = 1 - \frac{\langle f \cdot g \rangle}{\sqrt{\langle f^2 \rangle}\sqrt{\langle g^2 \rangle}} \qquad \text{Eq. 5}$$

- La fonction d'autocorrélation normalisée centrée (Zero Mean Normalized Cross-Correlation) :

$$C_{ZNCC} = 1 - \frac{\langle (f - \overline{f}) \cdot (g - \overline{g}) \rangle}{\sqrt{\langle (f - \overline{f})^2 \rangle}\sqrt{\langle (g - \overline{g})^2 \rangle}} \qquad \text{Eq. 6}$$

Où :

$$\begin{aligned} \langle f \rangle &= \int_D f(x)dx \\ \overline{f} &= \langle f \rangle \\ \overline{g} &= \langle g \rangle \end{aligned} \qquad \text{Eq. 7}$$

Toutes ces expressions s'annulent lorsque les deux fenêtres de corrélation sont identiques. L'intégration utilisée pour définir les coefficients de corrélation ci-dessus est en général remplacée par une somme discrète sur tous les pixels de la zone d'étude.

2.1.5 Interpolation des niveaux de gris, corrélation subpixel :

Lors de l'appariement, les coordonnées de la fonction de forme peuvent ne pas être entières. Nous sommes conduits à évaluer des niveaux de gris dans des images avec coordonnées non entières. Comme une image est une représentation discrète de la scène observée, il est nécessaire de faire une interpolation des niveaux de gris à l'aide d'une fonction bidimensionnelle appropriée. Les méthodes d'interpolation les plus fréquemment rencontrées sont :

- l'interpolation polynomiale, qui comprend les interpolations bilinéaire et bicubique ;
- l'interpolation B-spline ;
- L'interpolation de Fourier.

Il est à noter que selon [SCH02, BOR09, BOR07] l'interpolation B-spline quand son ordre est supérieur ou égal à trois permet de réduire significativement l'erreur systématique d'appariement.

2.1.6 Principe de la corrélation :

Pour cela, considérons deux signaux représentés par des fonctions de la position **x** et du déplacement u (x). La première représente l'image de référence f (x), la seconde l'image déformée g (x). Nous pouvons exprimer la seconde en fonction de

la première, en considérant que la première est décalée de u (x) et bruitée de b (x) [RET07, WAG02].

$$g(x) = f\left(x + u(x)\right) + b(x) \qquad \text{Eq. 8}$$

u représente le champ de déplacement recherché et b (x) un bruit aléatoire (bruit de photon, bruit de numérisation, bruit d'obscurité pour les caméras CCD [HOL98]). Le problème se ramène donc à déterminer u à partir de la seule connaissance de f et de g. En soi, ce problème est mal posé et il est nécessaire de faire des hypothèses supplémentaires quant à la régularité du champ de déplacement recherché [HOR81]. Soit la fonctionnelle E d'un champ de déplacement test v (x) :

$$E[v] = \left\| g - f(x - v) \right\|^2 \qquad \text{Eq. 9}$$

Cette fonctionnelle peut être utilisée pour déterminer des champs de déplacement rigide, mais aussi pour des champs à formulation affine ou pour les champs qui peuvent être développés en termes de série de Fourier [ROU02]. Les formulations variationnelles qui en découlent sont basées sur les équations du flot optique. Cette méthode n'est toutefois pas adaptée aux problèmes ayant des discontinuités de déplacement [MIT96].

Lorsque l'on choisit la norme quadratique $\|f\|^2 = \int |f(x)|^2 dx$, on aboutit à la méthode de minimisation de la différence quadratique utilisée en mécanique des fluides [GUI00] dans le cas d'un champ localement constant. Il s'agira alors de minimiser :

$$E_2[v] = \int_D \left[g(x) - f(x - v(x)) \right]^2 dx \qquad \text{Eq. 10}$$

Cette fonctionnelle atteint sa valeur minimale, lorsque v = u. Si l'on suppose que le déplacement est suffisamment petit en amplitude alors on peut procéder à un développement de Taylor qui aura pour conséquence de fournir un système linéaire pour les composantes du déplacement recherché [WAG02].

$$E_2[v] = \int_D \left[g(x) - f(x) + v(x)\nabla f(x) \right]^2 dx \qquad \text{Eq. 11}$$

Si l'on suppose que v est une translation d'un corps rigide, le problème peut être résolu par des méthodes d'intercorrélation [ROU02, SUT83] ou d'auto-corrélation. Le problème reviendra donc à maximiser la quantité h (v).

$$h(v) = (g * f) \equiv \int_D g(x) f(x - v) dx \qquad \text{Eq. 12}$$

Où * représente le produit d'intercorrélation. Le déplacement qui maximise ce produit correspond à une évaluation du déplacement inconnu u.

2.1.7 Analyse multiéchelle :

Le but est d'augmenter la résolution spatiale et la déformation maximale mesurable entre deux images consécutives [HIL02, BER04]. En pratique, on applique l'approche précédente de manière récursive sur des images à des échelles différentes. Dans un premier temps, il s'agit d'évaluer des déformations moyennes obtenues à partir de l'analyse avec des images où les détails les plus fins ont été supprimés. On réalise alors, à l'échelle la moins fine, un calcul de corrélation standard. Les déplacements interpolés obtenus servent ensuite comme première évaluation du champ à l'échelle suivante pour laquelle des détails ont été rajoutés. On procède ainsi jusqu'à revenir à l'image de départ (avec tous ses détails). Lors de la dernière étape, le déplacement n'est plus interpolé et on peut ainsi analyser des fluctuations dont les amplitudes sont supérieures à celles accessibles avec l'approche standard.

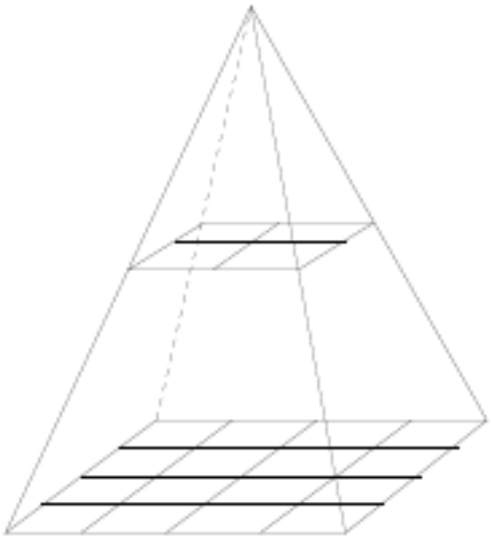


Figure 9 : Différentes échelles utilisées lors de l'approche multi-échelle.

Sur des images déformées, artificiellement, des déformations de l'ordre de ±30 % peuvent être évaluées [HIL02]. Quand une séquence de plus de deux images est analysée et lorsque l'image de référence est réactualisée (elle correspond à l'image déformée de l'étape précédente), il n'existe pas de limite à l'approche. Il faut néanmoins remarquer que les erreurs de mesure sont cumulées lors de ce type de traitement.

2.2 Filtration, détection de contour :

Afin d'améliorer la corrélation d'image, ou d'observer des détails peu visibles, il peut être intéressant d'utiliser des filtres de détection de contours. Sur les images, les contours des objets correspondent souvent aux extremas locaux du gradient ou aux zéros du Laplacien de la fonction de niveau de gris de l'image [HOR93]. Dans cette partie nous présenterons quelques filtres linéaires qui ont été employés.

2.2.1 Filtrage linéaire d'une image, principe :

Filtrer signifie convoluer une image I(x, y) avec une fonction f(x,y) qui se nomme la réponse impulsionnelle du filtre. Une image est un ensemble discret et borné, la convolution, dans ce cas, s'écrit :

$$\begin{aligned} I_f(x,y) &= (f * I)(x,y) \\ &= \sum_{a=-K/2}^{a=K/2} \sum_{b=-K/2}^{b=K/2} f(i-a, j-b) I(a,b) \end{aligned} \qquad \text{Eq. 13}$$

Le filtrage linéaire consiste à remplacer chaque niveau de gris par une combinaison des niveaux de gris des points voisins. Cette combinaison linéaire est définie par la réponse impulsionnelle du filtre. Parmi les types de filtres existants, on peut distinguer trois grandes familles : celle des filtres passe-bas, celle des filtres passe-haut.

2.2.2 Filtres passes-bas :

Ils ont pour effet de couper les hautes fréquences du signal. Lorsque l'on applique un tel filtre sur une image, le résultat est une image plus floue. Les variations de l'image sont donc atténuées. Ils sont utilisés pour atténuer les bruits d'origines les plus diverses qui polluent l'information, en particulier dans la détection de contours. Il s'agit de traductions discrètes de filtres continus qui ne modifient pas le niveau global du signal. Les termes de la matrice de convolution sont donc généralement des entiers à diviser par leur somme.

- *Filtre uniforme.* Il est obtenu par convolution de deux filtres unidimensionnels rectangulaires. Toutes les composantes de la matrice ont la même valeur. L'imperfection de ce filtre réside dans le fait qu'il introduit des déphasages.

- *Filtre pyramidal.* La convolution d'un filtre rectangulaire avec lui-même conduit à un filtre triangulaire grâce auquel les phases ne sont plus modifiées. Le filtre pyramidal est obtenu à partir de filtres triangulaires dans les deux directions.

- *Filtre gaussien.* Ce filtre utilise la loi de probabilité de Gauss. Des approximations de plus en plus précises peuvent être obtenues, selon le

Théorème de la limite centrale par itération de l'un des filtres précédents. Il est utilisé comme constituant du masque flou qui améliore la netteté apparente des photographies numériques.

2.2.3 Filtres passes-hauts :

Ces filtres transforment l'image d'entrée en une image noire sauf aux points où un contour est détecté qui est marqué en blanc. Les valeurs absolues importent peu, il est sans intérêt de changer d'échelle comme pour un lissage.

La détection est basée sur la dérivation selon les deux coordonnées. Si on considère classiquement les signaux comme des sommes de sinusoïdes, la dérivation apparaît comme un filtre passe-haut qui introduit donc du bruit à l'origine de faux contours. On peut citer :

- Le gradient d'une image est un filtre passe-haut d'ordre 1. Les extrémums locaux correspondent au bord recherché. Il est défini par :

$$G(x,y) = \left(\frac{\partial I}{\partial x}, \frac{\partial I}{\partial y} \right)^t \quad \text{Eq. 14}$$

- Le Laplacien d'une image est un filtre passe-haut d'ordre 2. Cette fois-ci les contours sont définis par un changement de signe. Il est défini par :

$$L(x,y) = \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \quad \text{Eq. 15}$$

2.2.4 La combinaison de filtres :

Du fait du filtrage passe-haut pour la détection de bord, le bruit du signal est augmenté. Pour compenser cette augmentation il peut être nécessaire de combiner les filtres passe-haut avec des filtres passes bas. Chaque filtre est en général la combinaison d'un filtre passe-bas, d'un filtre passe-haut et d'un seuillage. Dans le cas de filtres basés sur le gradient, le seuillage se fera par hystérésis des extrémums. Pour les filtres basés sur le Laplacien, on peut procéder à un seuillage des passages par zéro des faibles normes de gradient.

- *Filtre de Prewitt.* Le filtre de Prewitt introduit un flou, chacune des deux matrices étant le produit du gradient dans la direction considérée par un filtre de flou rectangulaire selon l'autre direction.

- *Filtre de Sobel.* La technique précédente est améliorée en remplaçant le filtre rectangulaire par un filtre triangulaire.

- *Filtre de Canny.* C'est un filtre de Sobel précédé par un lissage gaussien et suivi par un seuillage.

- *Filtre de Marr-Hildreth.* Le calcul du laplacien est précédé par un lissage gaussien avec deux variances ajustables pour filtrer les hautes fréquences.

2.3 Une vue :

2.3.1 Géométrie projective :

Une caméra, un appareil photographique, fournit des images 2D d'un monde en 3D. L'appareil effectue une transformation géométrique qui associe à un point de l'espace tridimensionnel, sa projection dans l'image plane. Cette transformation est appelée fonction de projection. Elle n'est en général pas quelconque et appartient à une famille de fonctions dépendantes du modèle de la caméra choisie. Le modèle le plus courant est le modèle projectif linéaire ou sténopé. Il réalise une projection centrale de l'espace euclidien sur une surface. C'est le principe de l'appareil photographique à trou d'épingle.

Pour décrire mathématiquement la projection réalisée, il faut décrire l'espace à 3 dimensions en choisissant une géométrie adaptée à la projection réalisée. Félix Klein, caractérise les géométries par des groupes de transformations, qui laissent invariantes certaines propriétés des objets de l'espace. La géométrie euclidienne est caractérisée par le groupe des transformations euclidiennes (translation, rotation) qui laissent invariants les rapports des distances et des angles. Elle est bien adaptée à notre perception du monde [JON06].

La projection réalisée par une caméra n'appartient pas au groupe des transformations euclidiennes. En effet, le parallélisme de deux droites n'est pas préservé par la projection, car les droites projetées sur l'image se coupent en un point de la ligne d'horizon. Elle est décrite par la géométrie projective qui est une extension de la géométrie euclidienne. Le groupe de transformations associé à la géométrie projective ne conserve que le birapport de points de l'espace, mais contient davantage de transformations, dont la projection réalisée par une caméra.

La construction de la géométrie projective s'est faite au cours de l'histoire. La majorité des résultats datent de la Grèce antique et de la renaissance. Les Grecs anciens découvrirent de nombreuses propriétés de la projection telles que la conservation du birapport et la notion de mouvement de parallaxe. Au quinzième siècle, en Europe, la volonté du réalisme picturale rendit nécessaire l'introduction d'une nouvelle méthode de représentation : la perspective. L'architecte florentin Brunelleschi décrivit le premier les règles de la perspective, règles reprises et développées par Alberti, Della Francesca, Dürer et Vinci. Les siècles suivants, des mathématiciens, Desargue, Pascal, Monge, Poncelet…, contribuèrent au développement de ces notions. Avec le développement des ressources informatiques, la géométrie projective est devenue un outil de premier plan pour la résolution des problèmes de vision par ordinateur. Faugeras, Kanatani, Hartley et Zimmerman ont en particulier écrit des ouvrages de référence sur le sujet.

2.3.2 Modèle sténopé :

Il est entièrement défini par deux éléments :

- un point C appelé centre optique ;
- un plan R ne contenant pas le centre optique, appelé plan rétinien.

Le centre optique C correspond à la position de la caméra. Le plan rétinien R est le plan de formation des images. La longueur focale est la distance strictement positive du point C au plan R. Le rayon optique est toute demi-droite d'extrémité C intersectant le plan R. L'axe optique est l'axe orthogonal à R passant par C, il définit sur R le point principal c. L'image m par la fonction de projection d'un point M de l'espace est l'intersection du rayon optique CM avec le plan R.

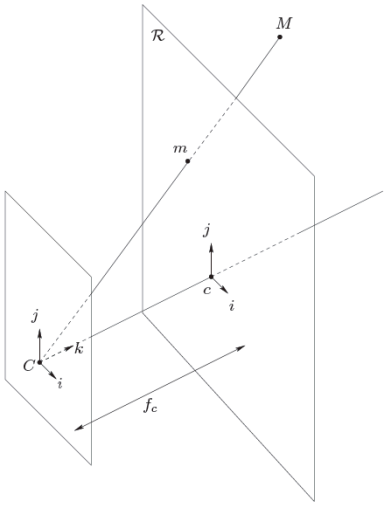


Figure 10: modèle sténopé

Munissons le centre optique de la caméra d'un repère orthonormé de R3(C, i, j, k), tel que k soit un vecteur directeur de l'axe optique. Dotons le plan rétinien d'un repère orthonormé R2(c, i, j), ayant pour origine c et dont les axes de coordonnées sont parallèles à ceux du repère associé à la caméra. Le point principal c du plan rétinien est défini par l'intersection de l'axe Ck avec le plan rétinien. Dans ces deux systèmes de coordonnés, l'expression de la fonction de projection résulte de l'application du théorème de Thalès. Soit un point M de coordonnées (X, Y, Z) exprimées dans le repère caméra. Les coordonnées (x, y) du point m, projeté du point M sur le plan rétinien seront définies par :

$$x = f_c \frac{X}{Z}$$
$$y = f_c \frac{Y}{Z}$$

Eq. 16

Remarque : *Deux triplets de coordonnées proportionnelles de l'espace sont projetés en un même point du plan rétinien. Tous les points M d'un rayon optique ont ainsi une projection unique sur le plan rétinien. Il est donc impossible*

de déterminer les profondeurs Z des points projetés sur une image à partir de cette seule image.

Suite à cette remarque, introduisons les coordonnées homogènes. Si (x, y) sont les coordonnées euclidiennes d'un point sur un plan, ses coordonnées homogènes sont définies par (Lx, Ly, L), pour tout réel L non nul. L'espace des triplets de coordonnées ainsi définis avec la règle que les triplets proportionnels représentent le même point est appelé plan projectif.

Cas général :

Soit (O,i',j',k') le repère orthonormé dans lequel sont repéré la position des points observés (repère objet), (C,i,j,k) le repère caméra, (c,i,j) le repère image. Si le système choisi de coordonnées dans R^3 n'est pas celui de la caméra (si l'on connaît les dimensions d'un objet) et que le repère choisi dans l'image ne correspond pas à (c,i,j) (en effet, les coordonnées des images sont souvent référées par rapport au coin supérieur gauche), comme illustré sur la figure suivante. La projection du point M sur le plan rétinien revient alors à faire [HAR03, HOR93] :

- un changement de repère du repère donné vers (C,i,j,k) ;
- une projection de (C,i,j,k) dans (c,i,j) ;
- et pour finir un changement de repère dans l'image, de (c,i,j) vers le repère choisit.

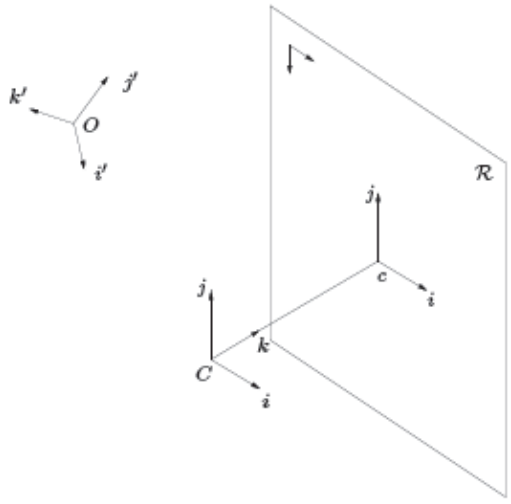


Figure 11: Les repères de la projection.

Le changement de repère de (O,i',j',k') vers (C, i, j, k) peut se décomposer en une rotation R suivie d'une translation de vecteur t (transformation rigide). Les coordonnées du point M dans le repère objet sont exprimé dans le repère caméra par :

$$\underline{M} = TM \qquad \text{Equ. 17}$$

Où $T = \begin{pmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, R est la matrice de rotation et t le vecteur translation. Les paramètres de T sont appelés paramètre extrinsèque de la caméra.

Une transformation des coordonnées du point $\underline{M}$ dans le repère caméra (C,i,j,k) vers les coordonnées du point $\underline{m}$ (projeté du point $\underline{M}$ sur l'image) dans le repère image (c, i, j) :

$$\underline{m} = P\underline{M} \qquad \text{Eq. 18}$$

La transformation P nous fait passer d'un espace à trois dimensions vers un espace à deux dimensions. C'est la projection proprement parler.

Une transformation affine permettant de passer du système de coordonnées cartésiennes vers le système de coordonnées image (pixels) :

$$m = A\underline{m} \qquad \text{Eq. 19}$$

La composition de ces trois transformations permet d'exprimer les coordonnées du point m à partir des coordonnées du point M. C'est la transformation effectuée par une caméra.

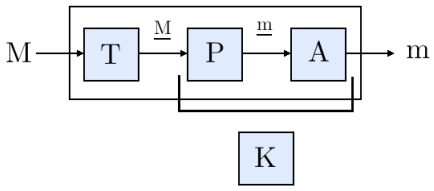


Figure 12: Diagramme du modèle projectif [COR05]

Les paramètres de A et P définissent les caractéristiques intrinsèques du système optique. Ils ont pour expression [SUV06, JON06] :

$$A = \begin{pmatrix} \alpha_x & s & c_x \\ 0 & \alpha_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} P = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow K = \begin{pmatrix} f_x & s & c_x & 0 \\ 0 & f_y & c_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \qquad \text{Eq. 20}$$

Où :

- c_x et c_y sont respectivement les coordonnées horizontales et verticales du point principal du plan rétinien.
- $f_x = \alpha_x.f$ et $f_y = \alpha_y.f$ sont respectivement le facteur d'échelle horizontale et verticale multiplié par la distance focale.

- s est le paramètre relatif a l'angle entre l'axe x et y du plan rétinien. Usuellement c'est angle est égale à 90° et s = 0.

Les paramètres de T définissent les paramètres extrinsèques du système de prise de vue. Ils sont représentatifs d'une rotation et d'une translation. T a pour expression :

$$T = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Eq. 21}$$

La composition de K et de T définit la matrice de transformation du modèle sténopé. Elle a pour expression :

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} \end{pmatrix} \quad \text{Eq. 22}$$

Où :

$$\begin{aligned} h_{11} &= f_x r_{11} + s r_{21} + c_x r_{31} & h_{12} &= f_x r_{12} + s r_{22} + c_x r_{32} \\ h_{13} &= f_x r_{13} + s r_{23} + c_x r_{33} & h_{14} &= f_x t_x + s t_y + c_x t_z \\ h_{21} &= f_y r_{21} + c_y r_{31} & h_{22} &= f_y r_{22} + c_y r_{32} \\ h_{23} &= f_y r_{23} + c_y r_{33} & h_{24} &= f_y t_y + c_y t_z \\ h_{31} &= r_{31} & h_{32} &= r_{32} \\ h_{33} &= r_{33} & h_{34} &= t_z \end{aligned} \quad \text{Eq. 23}$$

Tous les éléments de la matrice H peuvent être divisés par t_z afin que le paramètre h_{34} soit égal à 1.

2.3.3 Modèle non linéaire : Déformation des images

Dans certains cas, les images présentent des déformations qui ne peuvent être décrites par le modèle sténopé. Ces déformations peuvent, si elles sont importantes avoir une grande influence sur la précision des applications de traitement d'images tel que la corrélation ou la reconstruction tridimensionnelle. Pour les décrire, il est nécessaire d'adjoindre au modèle précédent une transformation issue des modèles décrivant ces transformations. Ces modèles sont non linéaires. Il existe trois types de déformation, aussi appelés distorsion [FRY94, KAL09] :

- la distorsion radiale ;
- la distorsion de décentrage ;
- la distorsion prismatique.

Figure 13: Exemple de distorsion

Dans la pratique plutôt que de définir une transformation entre les coordonnées issues du modèle projectif et les coordonnées réelles des points de l'image, on préfère rectifier l'image de sorte que ses points respectent le modèle projectif (cf. Figure 14). Cela se traduit par l'addition d'un terme correctif aux coordonnées images {x,y} pour obtenir les coordonnées corrigées $\{x_d,y_d\}$ [COR05].

$$\begin{aligned} x_d &= x + \delta_x(x,y) \\ y_d &= y + \delta_y(x,y) \end{aligned} \qquad \text{Eq. 24}$$

Les termes $\delta_x(x,y)$ et $\delta_y(x,y)$ représentents la somme de plusieurs termes correctifs correspondants aux différents types de distorsion considérés et au degré d'approximation du modèle choisi. Pour un point de coordonnées {m} :

$$m_d = m + \overbrace{\underbrace{\delta_r(m)}_{Radiale} + \underbrace{\delta_d(m)}_{Décentrage} + \underbrace{\delta_p(m)}_{\text{Pr ismatique}}}^{Totale} \qquad \text{Eq. 25}$$

Figure 14: Exemple de rectification d'une image.

Distorsion radiale :

La distorsion radiale est la distorsion la plus significative qui affecte les images produites par un objectif constitué de lentilles. La position des points est d'autant plus distordue que les points sont éloignés du centre de l'image. Elle présente une symétrie de révolution par rapport à l'axe optique. Elle est due à des défauts de

courbures radiales des lentilles. Elle est définie selon le modèle des aberrations de Seidel [DAU94, WAN07, WEN92, BRO71] :

$$d_x(x,y) = x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + ...)$$
$$d_y(x,y) = y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + ...) \quad \text{Eq. 26}$$

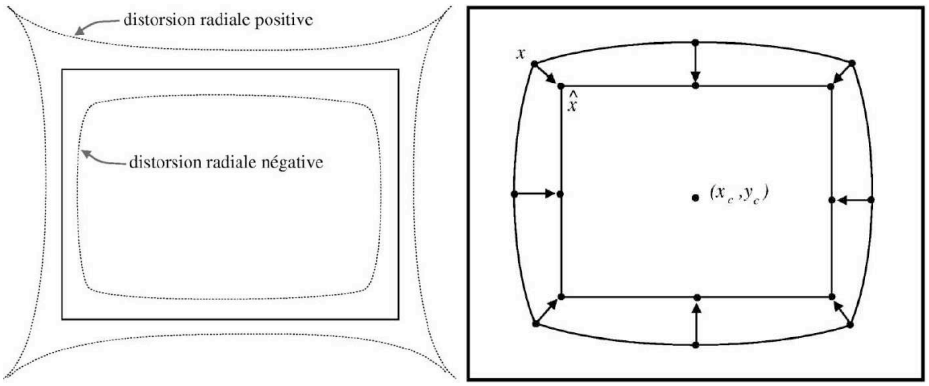


Figure 15: Exemple de distorsion radiale, x correspond à la position du pixel qui apparaît sur l'image, $\hat{x}$ correspond à la position corrigée.

Distorsion de décentrage :

La distorsion de décentrage est due à un mauvais alignement des centres optiques des lentilles. Elle peut être définie de la manière suivante [WAN07, WEN92] :

$$d_x(x,y) = \left[p_1(r^2 + 2x^2) + 2p_2 xy\right](1 + p_3 r^2 + ...)$$
$$d_y(x,y) = \left[p_2(r^2 + 2y^2) + 2p_1 xy\right](1 + p_3 r^2 + ...) \quad \text{Eq. 27}$$

avec : $r = \sqrt{x^2 + y^2}$

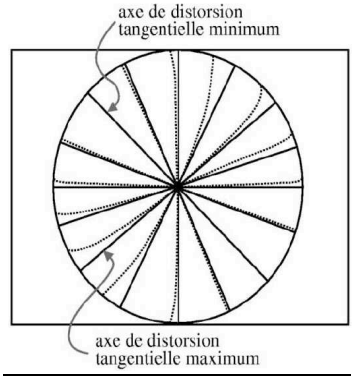


Figure 16: distorsion de décentrage

Distorsion prismatique :

La distorsion prismatique est due à une inclinaison du système optique avec le capteur de la caméra. Elle a pour effet de transformer un rectangle en un prisme. Elle décale la position du point principal du plan rétinien. Ce qui a pour

conséquence de que le point principal du plan rétinien ne se trouve pas au centre du capteur. Elle peut être définie de la manière suivante [WAN07, WEN92] :

$$d_x(x,y) = s_1 r^2 + s_1' r^4 + s_1'' r^6 + \ldots$$
$$d_y(x,y) = s_2 r^2 + s_2' r^4 + s_2'' r^6 + \ldots \qquad \text{Eq. 28}$$

avec : $r = \sqrt{x^2 + y^2}$

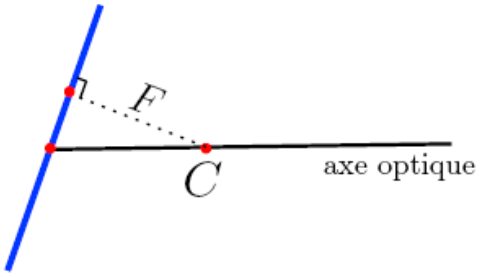


Figure 17: Distorsion prismatique.

2.3.4 Le modèle complet :

En combinant le modèle projectif (sténopé) au modèle de distorsions, on obtient le modèle complet de la transformation qui liera les coordonnées du point M de l'espace au coordonnée de points m_d de l'image distordue [COR05].

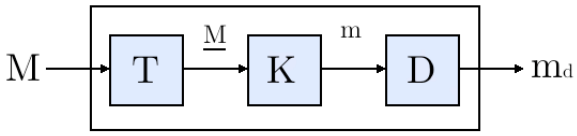


Figure 18: Diagramme projectif complet

Dans la pratique il est d'usage de découpler la détermination des paramètres de distorsion, de ceux de la projection.

2.3.5 Calibration :

Calibrer un système optique revient à déterminer la transformation globale des points du monde tridimensionnel vers leur projeté sur l'image. Cette transformation a été présentée dans les sections précédentes. Elle est issue de la composition des transformations du modèle sténopé et des modèles de distorsions. La calibration permet donc d'estimer les paramètres de cette transformation. Pour cela un ensemble de points tridimensionnel et leur projection est nécessaire. Cet ensemble de points peut provenir de la géométrie observée, ou d'une mire de calibration. Toutefois dans le cas de l'utilisation de la géométrie un grand nombre de points est nécessaire pour définir les distorsions du système d'acquisition. En pratique les points de la géométrie sont plutôt utilisés pour faire un calcul de l'orientation de la caméra par rapport à l'objet [AND98]. On parlera alors de

calcul de pose [AME02, MAU02]. Notons enfin que la géométrie de la mire de calibration n'est pas toujours connue avec précision. Les points 3D de la mire de calibration peuvent être ré estimé au cours du processus de calibration [LAV98].

Deux approches permettent la détermination des paramètres internes et externes des caméras [DAU94]. La première consiste à globaliser la détermination des paramètres interne et externe du dispositif d'acquisition, à partir de la mise en correspondance d'un ensemble de points issus d'une mire de calibration avec leur projection sur le plan image [ZAN99, YOS09]. La seconde consiste à découpler la recherche des paramètres interne et externe en exploitant des propriétés géométriques particulières. Par exemple, celles des points de fuite de faisceaux orthogonaux de droites parallèles de l'espace [CIP99, GUI00].

Un certain nombre d'outils permettant de procéder à la calibration de son système optique existent de manière libre. Ils vont du système complet avec interface graphique tel que *« Camera Calibration Toolbox for Matlab »* à la bibliothèque de programmation tel que OpenCV fonctionnant avec les langages C++, C et Python.

2.4 Deux vues :

2.4.1 Relation entre deux caméras

Un capteur d'image est défini par une transformation projective qui associe aux points 3D de l'espace un ensemble de points 2D du plan projectif. Cette transformation supprime la troisième dimension. Elle est donc irréversible, car à partir d'un point 2D nous pouvons seulement définir le rayon de projection (qui est infini) et non ses coordonnées 3D.

En disposant au minimum de deux images d'un objet acquises de deux points de vue, il devient possible, par triangulation de définir la position 3D des points de l'objet observé. Dans ce cas nous disposons d'assez d'information pour obtenir une unique solution au problème de la position 3D des points [KRA97].

La triangulation consiste à déterminer l'intersection des rayons de projection d'un même point issus des deux images. Pour cela il est nécessaire d'exprimer ces deux lignes dans le même système de coordonnées, c'est-à-dire de connaître la transformation rigide existant entre les deux points de vue. Cette transformation est la composition d'une matrice de rotation et d'une matrice de translation. La précision de ces informations étant critique, il est préférable de les récupérer à partir des images plutôt que de faire confiance à des capteurs de positions. Cela est possible en utilisant une contrainte géométrique entre n'importe quelle paire d'images [TOS87, HAR03, HOR93].

Si nous disposons de deux prises de vue provenant de caméras calibrées alors en se restreignant aux paramètres extrinsèques des caméras :

$$\begin{gathered} MT_g = \underline{M_g} \\ MT_d = \underline{M_d} \\ donc \\ \underline{M_g} T_g^{-1} T_d = \underline{M_d} \end{gathered} \qquad \text{Eq. 29}$$

Avec T la transformation pour l'image de gauche et T' la transformation pour l'image de droite. Cette relation permet d'exprimer les points du repère caméra de gauche dans le repère caméra de droite [HOR93].

2.4.2 Effet de parallaxe :

Considérons deux vues différentes d'une même scène. Deux points, l'un de la première image, l'autre de la seconde, sont appariés (ou en correspondance) s'ils sont les projections d'un même point de l'espace 3D. En général, on ne peut associer des points de la première image à des points de la seconde, car la visibilité d'un point de l'espace dépend de sa profondeur. C'est l'effet de parallaxe illustré sur la figure (1.6). Les points M1 et M2 de l'espace ont même projection sur la première image et deux projections distinctes sur la deuxième image, du fait de leurs profondeurs différentes, ce qui entraine qu'il est impossible de les apparier [JON06].

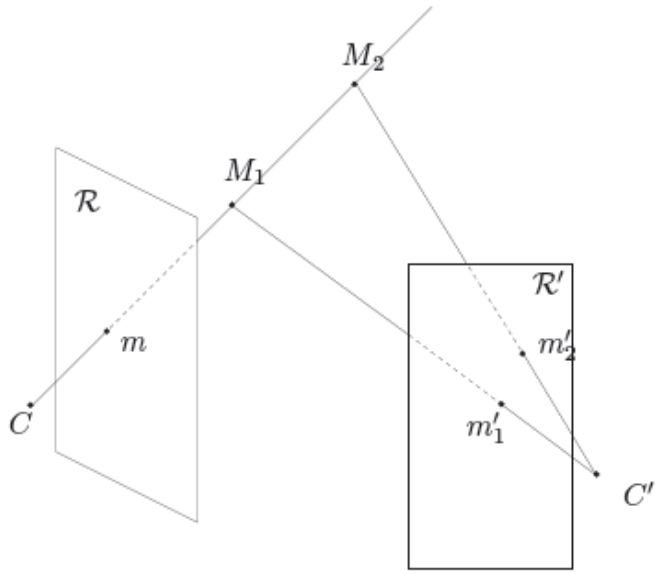


Figure 19 : effet de parallaxe

Deux cas particuliers ne sont pas concernés par le problème de l'effet de parallaxe, ce qui rend alors possible la mise en correspondance des points des images :

Lorsque les caméras filment un plan de l'espace qui ne passe pas par des centres optiques C et C', il n'ya pas d'effet de parallaxe, en effet aucun phénomène d'occultation d'une image a l'autre n'est possible.

Lorsque la caméra effectue une rotation ayant pour centre son centre optique, alors un point de l'espace occulté lors de la projection sur le premier plan rétinien ne pourra pas apparaître sur le second.

2.4.3 Géométrie épipolaire :

La géométrie épipolaire, caractérisée par une matrice 3x3, décrit la relation entre deux images d'un même objet. Elle contient toutes les informations géométriques des deux images [KAL09].

Soit R = (R ; t) la relation de transformation entre deux caméras. Soit M un point de l'espace et ses images m et m' sur les images f et g des plans R et R'. Connaissant la transformation entre les caméras et les deux vues correspondantes, on ne peut mettre en correspondance le point m de f avec le point m' de g à cause de l'effet de parallaxe. Cependant, le point m' ne peut se placer en tous les points de g : c'est la contrainte épipolaire énoncée ci-après.

La ligne CC' intersecte les plans rétiniens R et R' respectivement en deux points e et e' appelés épipoles. Les droites de R et R' passant par e et e' sont appelées droites ou lignes épipolaires. Dans le cas où le plan R ou le plan R' est parallèle à la droite CC', l'épipole contenu dans ce plan est à l'infini et les droites épipolaires de ce plan sont des droites parallèles à la droite CC'.

Le rayon optique (CM) ou (Cm) est projeté sur l'image g en une droite passant par l'épipole e' et par l'image d'un point du rayon. Cette droite est appelée l'$_m$ ligne épipolaire de m', car le point m' doit appartenir à cette droite. De la même façon, pour tout point m' appartenant à g, le point correspondant dans f, m, doit appartenir à la ligne épipolaire lm'. C'est la contrainte épipolaire, illustrée sur la figure (Figure 20). Géométriquement, cette contrainte traduit la coplanarité des vecteurs, $\overrightarrow{CM}$, $\overrightarrow{C'M}$ et $\overrightarrow{CC'}$.

Les paragraphes suivants développent les notions de matrice fondamentale et matrice essentielle liant les coordonnées projectives d'un point m à la ligne épipolaire correspondante [FAU93, FAU00, HAR03].

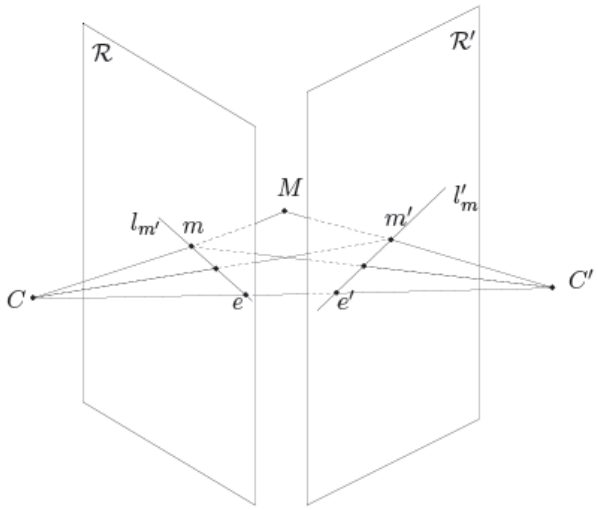


Figure 20: contrainte épipolaire

Matrice fondamentale :

La matrice fondamentale F décrit l'application linéaire en coordonnées projectives, liant un point m de R à sa ligne épipolaire l'$_m$ dans R'. La représentation projective de l'$_m$ de la ligne épipolaire de m vérifie :

$$l'_m = Fm \qquad \text{Eq. 30}$$

Comme m' appartient à l'$_m$,

$$m'^T Fm = 0 \qquad \text{Eq. 31}$$

La ligne épipolaire l'$_m$ de $\underline{m}$ est représentée par F$\underline{m}$, la ligne épipolaire $l_{m'}$ de $\underline{m'}$ est représentée par $F^T\underline{m'}$.

La matrice fondamentale F s'écrit en fonction des paramètres de l'homographie épipolaire. Dans l'équation $\underline{m'}^T F\underline{m}=0$, $\underline{m}$ et $\underline{m'}$ sont utilisé en coordonnées projectives dans le repère de référence de l'espace R^3. F est utilisé dans le cas de caméras non calibrées. Elle peut être estimée à partir d'au moins huit correspondances de points entre les deux images [CLE01].

Matrice essentielle :

Supposons que le système d'acquisition soit calibré, c'est-à-dire que les matrices A et A' contenant les paramètres intrinsèques des caméras soit connu. Soit un point m du plan rétinien R, image d'un point M de l'espace.

$$\underline{m} = A^{-1}m \qquad \text{Eq. 32}$$

Alors :

$$m'^{T} F m = \underline{m}'^{T} (A'^{T} F A) \underline{m} = 0 \qquad \text{Eq. 33}$$

La matrice $A'^{T} F A$ est appelée matrice essentielle E. L'équation liant les coordonnées normalisées de deux points de R et R' prend la forme :

$$\underline{m}'^{T} E \underline{m} = 0 \qquad \text{Eq. 34}$$

Cette relation est connue sous le nom d'équation de Longuet-Higgins [LUO93]. Dans [HAR03], il est montré que E est issue de la composition d'une translation et d'une rotation.

$$E = [t] \times R \qquad \text{Eq. 35}$$

La matrice essentielle a seulement 5 degrés de liberté : 3 pour la rotation, 3 pour la translation moins un car l'échelle de la translation est indéterminée. Sa détermination ne nécessite que la connaissance d'au moins cinq correspondances.

2.4.4 Calibration d'un système stéréo :

Le calcul des paramètres extrinsèques des caméras à partir de plusieurs vues à l'aide de points d'intérêt est à la base de la reconstruction 3D d'une scène. Il existe deux grandes méthodes, issues des communautés de photogrammétries et de vision par ordinateur pour définir l'orientation des caméras [KAL09].

La première est basée sur les équations de colinéarité. Celles-ci consistent à dire que le point terrain M le sommet de prise de vue S (centre optique) et m la projection de M sur le plan image, sont sur la même droite. Pour cette méthode nous avons besoin des coordonnées images certains points observés (les points d'appui) et des informations sur la calibration de la caméra. Si les points d'appui sont exprimés dans un référentiel connu, il est possible de définir l'orientation absolue des caméras. S'ils ne sont pas exprimés dans un référentiel connu alors nous ne pouvons définir que l'orientation relative des caméras. Les coordonnées des points sont soit obtenues dans un référentiel connu avec une échelle, dans le cas de l'orientation absolue, soit dans le cas de l'orientation relative, dans le référentiel de la première image et sans échelle. Il est possible de passer de l'orientation relative à une orientation absolue à condition de disposer de point connu dans le référentiel voulu. Il faut un minimum de 5 couples de points pour déterminer l'orientation relative des caméras. En général plus de points sont disponibles. Il faudra alors résoudre le système d'équations obtenu par la méthode des moindres carrés.

La seconde est basée sur les contraintes de coplanarité entre deux images. Elle exprime le fait que le vecteur de visée depuis le premier sommet de prise de vues $\vec{V_1}$, le vecteur de visée depuis le deuxième sommet de prise de vues (et exprimé dans le référentiel du premier) $\vec{V_2}$, ainsi que le vecteur de la translation (entre les

deux sommets de prises de vues) $\vec{T}$ se trouvent dans le même plan, appelé le plan épipolaire. Cette condition de coplanarité s'exprime par un produit mixte nul entre ces trois vecteurs.

La contrainte de coplanarité est exploitée par la communauté de vision par ordinateur. Différentes méthodes de détermination de la transformation ont été proposées [HAR03, LUO93].

2.5 Méthode de reconstruction 3D

La reconstruction tridimensionnelle à partir d'une paire d'images suppose que l'on dispose de correspondances entre les deux images. Le type de reconstruction qu'on peut alors effectuer dépend du type de calibrage dont on dispose. On peut distinguer les cas suivants [HOR93] :

- le capteur stéréoscopique est calibré et on dispose alors de paramètres internes de chaque caméra ainsi que de la transformation rigide entre les deux caméras, dans ce cas on obtient une reconstruction euclidienne dans le repère de calibrage ;
- les paramètres internes de chaque caméra sont connus, mais la transformation rigide entre les deux caméras n'est pas connue Il faut alors estimer la matrice essentielle à partir de laquelle on peut extraire la transformation rigide entre les deux caméras à un facteur d'échelle près, dans ce cas on obtient une reconstruction euclidienne dans le repère de l'une ou l'autre des deux caméras ;
- si aucun calibrage n'est disponible ni les paramètres internes des caméras ni la transformation rigide entre les deux caméras il faut alors estimer la matrice fondamentale comme il a été expliqué précédemment. À partir de la matrice fondamentale, on peut obtenir une reconstruction projective tridimensionnelle.

Dans le cas où toutes les informations sur les caméras et leur positionnement respectif sont connues, les coordonnées X,Y,Z du point reconstruit se calculent en résolvant ce système de 4 équations linéaires.

$$
\begin{aligned}
X &= (Z - Z_0)\frac{r_{11}^1\alpha_y^1(x^1 - c_x^1) + r_{21}^1\alpha_x^1(y^1 - c_y^1) + r_{31}^1\alpha_x^1\alpha_y^1}{r_{13}^1\alpha_y^1(x^1 - c_x^1) + r_{23}^1\alpha_x^1(y^1 - c_y^1) + r_{33}^1\alpha_x^1\alpha_y^1} + X_0 \\
Y &= (Z - Z_0)\frac{r_{12}^1\alpha_y^1(x^1 - c_x^1) + r_{22}^1\alpha_x^1(y^1 - c_y^1) + r_{32}^1\alpha_x^1\alpha_y^1}{r_{13}^1\alpha_y^1(x^1 - c_x^1) + r_{23}^1\alpha_x^1(y^1 - c_y^1) + r_{33}^1\alpha_x^1\alpha_y^1} + Y_0 \\
X &= (Z - Z_0)\frac{r_{11}^2\alpha_y^2(x^2 - c_x^2) + r_{21}^2\alpha_x^2(y^2 - c_y^2) + r_{31}^2\alpha_x^2\alpha_y^2}{r_{13}^2\alpha_y^2(x^2 - c_x^2) + r_{23}^2\alpha_x^2(y^2 - c_y^2) + r_{33}^2\alpha_x^2\alpha_y^2} + X_0 \\
Y &= (Z - Z_0)\frac{r_{12}^2\alpha_y^2(x^2 - c_x^2) + r_{22}^2\alpha_x^2(y^2 - c_y^2) + r_{32}^2\alpha_x^2\alpha_y^2}{r_{13}^2\alpha_y^2(x^2 - c_x^2) + r_{23}^2\alpha_x^2(y^2 - c_y^2) + r_{33}^2\alpha_x^2\alpha_y^2} + Y_0
\end{aligned}
\qquad \text{Eq. 36}
$$

Suivant le fait que l'on choisisse une caméra comme repère de référence alors les termes de translation et de rotation relatifs à cette caméra disparaissent.

Ce système peut s'écrire sous la forme :

$$
\begin{aligned}
X &= (Z - Z_0)A^i + X_0 \\
Y &= (Z - Z_0)B^i + Y_0
\end{aligned}
\qquad \text{Eq. 37}
$$

Ce qui peut se mettre sous la forme :

$$
\begin{aligned}
X - A^i Z &= X_0 - Z_0 A^i \\
Y - B^i Z &= Y_0 - Z_0 B^i
\end{aligned}
\qquad \text{Eq. 38}
$$

Il existe trois grandes méthodes de reconstructions, à partir des paramètres de la transformation du système stéréoscopique.

- La reconstruction par intersection des rayons optiques : théoriquement, ces rayons se croisent en au point recherché. Dans la pratique, à cause du bruit dans les images et des incertitudes sur les matrices de projection calculées, les rayons otiques issus des points appariés ne se croisent pas. Sauf si la contrainte épipolaire est imposée lors de l'appariement, ce qui n'est pas notre cas.

- La reconstruction par distance minimale entre deux rayons optiques. Cette méthode est similaire à la précédente, elle consiste à trouver le point le plus proche des deux rayons optiques.

- La reconstruction par reprojection sur les images. Cette méthode consiste à déterminer les coordonnées du point M qui minimisent les distances mesurées dans les images entre les points observés et la projection de leur reconstruction.

Nous avons choisi de déterminer les points de l'espace qui minimisent les conditions algébriques d'appartenances aux deux rayons optiques. Pour ce faire, le système Eq. 36 a été résolu par la méthode des moindres carrés.

3 Modélisation d'un fluide chargé

3.1 Equations de bilan

Soit une entité physique C parcourant un domaine matériel D, de dimensions finies, et de frontière S fixe. Cette entité physique peut être la masse de matière contenue dans D, sa quantité de mouvement, etc., C peut donc être une fonction scalaire ou vectorielle. L'étude de cette grandeur C repose sur l'établissement de sont bilan dans le domaine D pendant la durée dt. Le bilan de la grandeur C peut s'exprimer par : Taux de variation = Échanges + Sources. Le terme « Échange » est décomposé en deux mécanismes : le premier par diffusion et le second par convection [PAD91; COI01].

Ce qui pour une grandeur scalaire prend la forme :

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_D C dD + \int_S C\vec{V}\cdot\vec{n}dS = \int_D q_I dD - \int_S \overrightarrow{q_S}\cdot\vec{n}dS \qquad \text{Eq. 39}$$

Dans le membre de gauche, le premier terme représente la variation de la grandeur considérée, le second terme représente le terme d'échange par convection. Dans le membre de droite, le premier terme représente la source et le second terme représente le terme de transport par diffusion.

Ou sous forme locale, après avoir converti les intégrales de surfaces :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + div\left(C\vec{V}\right) = q_I - div\left(\overrightarrow{q_S}\right) \qquad \text{Eq. 40}$$

En prenant le même raisonnement, mais cette fois appliquée à une grandeur vectorielle, on obtient, le bilan, sous forme intégrale :

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_D \vec{C}dD + \int_S \vec{C}\left(\vec{V}\cdot\vec{n}\right)dS = \int_D \overrightarrow{q_I}dD - \int_S \overline{\overrightarrow{q_S}}\cdot\vec{n}dS \qquad \text{Eq. 41}$$

Et sous forme locale

$$\frac{\partial \vec{C}}{\partial t} + div\left(\vec{C}\otimes\vec{V}\right) = \overrightarrow{q_I} - div\left(\overline{\overrightarrow{q_S}}\right) \qquad \text{Eq. 42}$$

Ici q_I représente le terme source et q_S la densité de flux des sources de surfaces.

3.2 Équations de continuité

L'équation de continuité d'un fluide de densité volumique ρ et de vitesse V est donnée sous forme différentielle :

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho + div(\rho\vec{V}) = 0 \qquad \text{Eq. 43}$$

Dans le cas où l'on fait un bilan de masse pour un constituant du fluide

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho_A + div(\rho_A \vec{V}) = q_{IA} - div(\vec{q}_{SA}) \qquad \text{Eq. 44}$$

- q_{IA} : taux de production locale de A en kg/m^3.s
- q_{SA} : vecteur densité de flux de masse relatif au constituant A pour les sources de surface en kg/m^2.s

3.3 Bilan de quantité de mouvement

En partant de l'équation de bilan d'une grandeur vectorielle, et d'après la loi fondamentale de la dynamique, les sources de quantité de mouvement sont les forces appliquées au système. Elles se divisent en deux catégories :

- les forces de volumes, représentées par un champ continu F(x,y,z,t) sur D, tel que : les forces de pesanteur, les forces électromagnétiques, etc. ;
- les forces de surfaces : le champ de contraintes de surfaces T ;

Le bilan de quantité de mouvement est donné sous forme différentielle par :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\vec{V}\right) + div\left(\overline{\overline{P}}\right) &= \rho\vec{F} - div\left(\overline{\overline{T}}\right) \\ div\left(\overline{\overline{P}}\right) &= \rho\vec{V}\cdot\overline{\overline{grad}}\vec{V} + \vec{V}div\left(\rho\vec{V}\right) \\ div\left(\overline{\overline{T}}\right) &= -\overrightarrow{grad}p + \mu\left(\Delta\vec{V} + \overrightarrow{grad}\left(div\vec{V}\right)\right) \end{aligned} \qquad \text{Eq. 45}$$

Dans le cas de la présence de plusieurs phases constituantes, les équations bilan de quantité de mouvement pour la phase constituante A seront obtenues en remplaçant la masse volumique du fluide par la masse volumique de la phase A. Dans ce cas les équations seront couplées par les équations de continuité des différentes phases.

Le recours à l'équation de continuité permet une simplification de l'équation de bilan qui prend la forme :

$$\begin{aligned} div(\rho\vec{V}) &= -\frac{\partial\rho}{\partial t} \\ \rho\frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + \rho\vec{V}.\overline{\overline{grad}}\vec{V} &= \rho\vec{F} - \overrightarrow{grad}p + \mu(\Delta\vec{V} + \overrightarrow{grad}(div\vec{V})) \end{aligned} \qquad \text{Eq. 46}$$

3.4 Résolution par une approche RANS :

Le principe consiste à ne calculer qu'une moyenne statistique de la solution exacte. Le système des équations de Navier Stokes est remplacé par un système d'équations sur les valeurs moyennes du champ [PAD91; CHA00; KUN08].

Les non-linéarités des termes convectifs du système initial font apparaître des quantités inconnues associées à des moyennes de produits de fluctuations : les tensions de Reynolds *(u'ᵢu'ⱼ)*. Ces termes supplémentaires doivent être modélisés pour fermer le système dans le cas d'écoulements turbulents. La fermeture est réalisée au moyen d'un modèle de turbulence (le modèle *k-ε* est le modèle le plus connu). Ceci permet de réduire considérablement le nombre de points de discrétisation et de traiter des configurations complexes.
Par construction, cette approche ne donne accès qu'aux propriétés « déterministes en moyennes » de l'écoulement.

Prenons l'exemple d'un fluide isochore. Les vitesses et la pression sont décomposées comme suit :

$$u = \bar{u} + u' \qquad p = \bar{p} + p' \qquad \text{Eq. 47}$$

Nous obtenons le système suivant.

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = 0$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i}\,\overline{u_j}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_j} + \frac{\mu}{\rho}\frac{\partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_j^{\,2}} - \frac{\partial \overline{u_i'}\,\overline{u_j'}}{\partial x_j} \qquad \text{Eq. 48}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \overline{u_j}\frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\upsilon + \frac{\upsilon_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + \left(2\upsilon_t \overline{S_{ij}} - \frac{2}{3}k\delta_{ij}\right)\overline{S_{ij}} - \varepsilon$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \overline{u_j}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \left(\upsilon + \frac{\upsilon_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x_j^{\,2}} + 2c_1\frac{\upsilon_t \varepsilon}{k}\overline{S_{ij}}\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - c_2\frac{\varepsilon^2}{k}$$

Avec :

$$k = \frac{1}{2}\overline{u_i'}\,\overline{u_i'}$$

$$\upsilon_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$C_\mu = 0{,}09; c_1 = 1{,}44; c_2 = 1{,}92; \sigma_k = 1; \sigma_\varepsilon = 1{,}3$$

Un ensemble de paramètres du modèle k-e

3.5 La Turbulence

3.5.1 Échelles des longueurs

Les structures turbulentes sont de tailles variable et constamment évolutive. Pour un écoulement donné, les dimensions des tourbillons sont comprises entre deux bornes. Au-delà d'une certaine dimension, le tourbillon perd son individualité et se trouve noyé dans l'écoulement général. En deçà d'une certaine taille minimale,

sa quantité de mouvement devient insuffisante pour assurer sa survie face aux effets de la viscosité du fluide.
Dans un écoulement turbulent, il se produit une cascade : chaque tourbillon franchit successivement divers échelons depuis la plus grande vers la plus petite des échelles, en se scindant à chaque étape en plusieurs tourbillons plus petits. Au cours de ce fractionnement, l'énergie cinétique du tourbillon est partagée entre les nouveaux tourbillons auxquels il a donné naissance. Au niveau des plus petites échelles, les effets de la viscosité deviennent prépondérants, le transfert d'énergie ne peut plus se faire vers de plus petites structures, il se fait par dégagement thermique. On distingue, dans les échelles de turbulence : les macros échelles ; les petites échelles ; et les micros échelles.
Une propriété importante des écoulements turbulents est que ce sont les grands tourbillons qui assurent l'essentiel du transport de l'énergie cinétique turbulente et que les petites structures assurent quant à elles l'essentiel de la dissipation.
Pour la simulation numérique, les grandes échelles constituent un critère d'estimation de la taille du domaine d'étude, et de la durée totale de simulation. Le choix d'un domaine de dimension inférieure à une macro échelle de longueur L conduirait à des résultats non significatifs puisque le calcul serait limité à l'intérieur d'un grand tourbillon. Il en irait de même pour une simulation numérique dont la durée serait inférieure à l'échelle de temps des grands tourbillons. Les micros échelles de longueur et de temps, quant à elles, permettent d'estimer les dimensions minimales de maillage, puisque, à une échelle inférieure, l'écoulement ne peut plus être considéré comme turbulent. Dans le cadre de l'utilisation de modèles pseudo laminaire (k-ε) les grandes échelles permettent de déterminer les valeurs des coefficients de ces modèles [CHA00; PAD91].

3.5.2 Coefficient de corrélation entre grandeurs fluctuantes

La définition des échelles de longueur (qu'elle soit intégrales, de Taylor ou de Kolmogorov) dans les cas d'écoulements particuliers tels que la turbulence de grille (Turbulence homogène Isotrope) ou généraux est basée sur une analyse des fluctuations de vitesses par la définition de coefficients de corrélation. Ils sont obtenus en normant la covariance par les écarts types respectifs.

On peut définir plusieurs types de coefficients de corrélations en considérant deux points A et B et un intervalle de temps τ :

- Coefficient d'intercorrélation

$$R_i(AB) = \frac{\overline{u_{iA} \cdot u_{iB}}}{\sqrt{\overline{u_{iA}^2} \cdot \overline{u_{iB}^2}}} \qquad \text{Eq. 49}$$

- Coefficient d'autocorrélation

$$R_i(A,\tau) = \frac{\overline{u_{iA}(t) \cdot u_{iA}(t+\tau)}}{\overline{u_{iA}^2}} \qquad \text{Eq. 50}$$

D'une façon générale, les coefficients d'intercorrélations permettent de définir la taille des tourbillons. Les coefficients d'autocorrélations permettent de déterminer la durée de vie d'un tourbillon.

3.5.3 Macro échelles de turbulence :

Macro échelles dynamiques des longueurs, échelles intégrales ou macro échelle de longueur de Taylor $\Lambda(t)$:

La convention la plus usuelle consiste à calculer la grandeur appelée échelle intégrale des longueurs dans la direction j pour les fluctuations u_i. Si on s'en tient à l'ordre de grandeur, l'échelle intégrale $L_{i,j}$ corresponds assez bien avec l'échelle moyenne des grands tourbillons.

$$L_{i,j} = \int_0^{\infty} R_i(A, r_j)\, dr_j \qquad \text{Eq. 51}$$

Il est possible admettre que les échelles des grands tourbillons correspondent à la distance L_{Ej} au-delà de laquelle le coefficient d'intercorrélation $R_i(A,r_j)$ devient inférieur à une valeur de R considéré comme minimum significatif [PAD91].

Macro échelles dynamique des temps ou macro échelle de temps de Taylor $\Lambda(x)$:

Elle sert à définir la durée de vie moyenne des grands tourbillons. Il suffit pour l'obtenir de remplacer le coefficient d'intercorrélation utilisé dans les échelles de longueur par le coefficient d'autocorrélation.

$$\tau_{ij} = \int_0^{\infty} R_i(A, \tau)\, d\tau \qquad \text{Eq. 52}$$

3.5.4 Micro échelles de turbulence

Micro échelles de Taylor :

Spatiale $\lambda(t)$:

$$\frac{\partial^2 R(A, r_j)}{\partial r^2} = -\frac{2}{\lambda^2(t)} \qquad \text{Eq. 53}$$

Temporelle $\lambda(x)$:

$$\frac{\partial^2 R(A, \tau)}{\partial \tau^2} = -\frac{2}{\lambda^2(\vec{x})} \qquad \text{Eq. 54}$$

3.6 Expression de la vitesse d'une particule

L'expression de la vitesse d'une particule dans un écoulement est basée sur un bilan des forces s'appliquant sur la particule considérée. On peut y intégrer différentes forces allant de la gravité aux forces électromagnétiques. Suivant la concentration en particules de l'écoulement, elles peuvent non seulement avoir une influence sur la phase porteuse, mais aussi avoir une influence sur elles même [DOM97; OES06; BRE05].

Dans une première approche, pour simplifier les écritures nous retiendrons le cas d'une particule dans le champ de pesanteur soumise à la poussée d'Archimède :

$$\frac{\pi D_p^3}{6}\rho_p\frac{dV}{dt} = -\frac{1}{2}C_D\frac{\pi D_p^2}{4}\rho_f|V-U|(V-U) + \frac{\pi D_p^3}{6}(\rho_p-\rho_f)g \qquad \text{Eq. 55}$$

Où C_D représente le coefficient de trainée .

Le nombre de Reynolds de la particule permet de définir le régime d'écoulement vu par la particule. Il représente le rapport entre la force d'inertie due aux accélérations ou décélérations de petites masses fluides autour de la particule en mouvement et les forces de frottement visqueux dues à la viscosité du fluide.

$$\mathrm{Re}_p = \frac{D_p\rho_f(V-U)}{\mu_f} \qquad \text{Eq. 56}$$

La continuité du milieu par rapport à une particule est caractérisée par le nombre de Knudsen. Il est défini par le rapport entre le libre parcours moyen des molécules du fluide et le rayon de la particule.

$$Kn = \frac{2\lambda_f}{D_p} \qquad \text{Eq. 57}$$

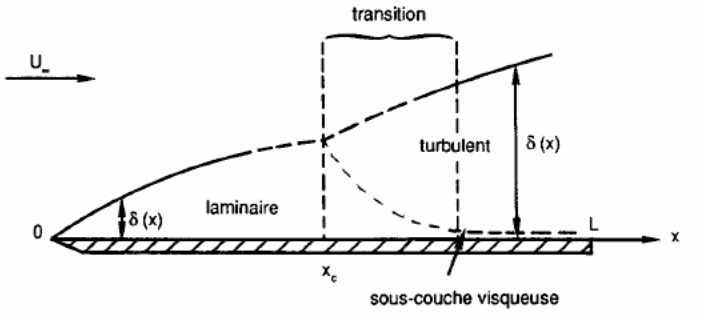
En fonction du nombre de Knudsen et du nombre de Reynolds de la particule, la force de trainée et le coefficient de trainée C_D prennent différentes expressions. On peut citer à titre d'exemple l'expression de Stockes, Oseen, de Milikan [REN98].

3.7 Couche limite :

Le long d'une paroi, en raison de sa viscosité, le fluide a une vitesse nulle. L'annulation de la vitesse se passe presque complètement dans une mince couche de fluide le long de la paroi. C'est la couche limite. Elle est caractérisée par le fait que le gradient de vitesse suivant la normale à la paroi y est important. Le mouvement dans la couche limite peut être laminaire ou turbulent.

3.7.1 Caractéristiques de la couche limite le long d'une plaque plane :

Le long d'une plaque plane la structure de la couche limite est la suivante [PAD91]:



Son épaisseur est définie comme la distance à la paroi δ telle que u = 0,99U∞.

L'évolution de l'épaisseur de la couche limite peut-être donnée par :

- pour la couche limite laminaire

$$\delta_L \approx 5\left(\frac{\upsilon x}{U_\infty}\right)^{-1/2} \qquad \text{Eq. 58}$$

- pour la couche limite turbulente

$$\delta_T \approx 0,37.x\left(\frac{U_\infty . x}{\upsilon}\right)^{-1/5} \qquad \text{Eq. 59}$$

L'épaississement de la couche limite est dû à la diffusion de la quantité de mouvement due à la viscosité du fluide. Dans le cas turbulent, cette diffusion est accentuée par le caractère turbulent de l'écoulement. C'est pourquoi dans ce cas la couche limite croît plus vite.

La transition entre la zone laminaire et turbulente est définie par un nombre de Reynolds critique. Lorsque le nombre de Reynolds longitudinal atteint une valeur maximum de 5.10^5 pour une plaque très lisse. Cette valeur tient plus d'un ordre de grandeur, car elle dépend de l'état de surface de la plaque.

$$\mathrm{Re}_C = \frac{U_\infty x_C}{\upsilon} \qquad \text{Eq. 60}$$

Ces relations définissent des ordres de grandeur des principales caractéristiques de la couche limite.

La faible épaisseur de la couche limite implique que la dérivée de la vitesse dans la direction y est beaucoup plus grande que les dérivée suivant x. Par ailleurs, la composante de vitesse suivant y est petite devant la composante de vitesse

suivant x. De plus, la pression est pratiquement constante au travers de la couche limite. Elle peut donc être définie par l'équation d'Euler en dehors de la couche limite.

3.7.2 Décollement de couche limite :

La configuration de l'écoulement peut imposer un gradient de vitesse $\partial U_x/\partial x$ non nul à l'extérieur de la couche limite. L'application de la loi de Bernoulli nous indique que la pression varie également dans la direction de l'écoulement moyen. En utilisant la condition d'incompressibilité, nous pouvons obtenir la composante de vitesse verticale u_y en fonction du gradient de vitesse longitudinal :

$$u_y(y) = -\int_0^y \frac{\partial u_x}{\partial x} dy \qquad \text{Eq. 61}$$

Si $\partial u_x/\partial x$ est positif la relation précédente nous indique que la composante verticale de vitesse sera négative. Le fluide est ramené vers la paroi. L'accélération de l'écoulement hors de la couche limite contribue donc à amincir la couche limite. En revanche, s'il y a décélération de l'écoulement hors de la couche limite, la composante de vitesse verticale de la couche limite est positive. Le fluide est éloigné de la paroi. Cet effet se rajoute à l'épaississement de la couche limite provoqué par la diffusion de la quantité de mouvement due à la viscosité. A l'extérieur de la couche limite, le gradient de pression est définit par:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} \qquad \text{Eq. 62}$$

La composante de vitesse u_y étant très petite, la pression à l'intérieur de la couche limite est très peu différente de la pression externe. Ainsi, la décélération de l'écoulement externe conduit à l'existence d'un gradient de pression adverse, qui s'oppose à l'écoulement dans la couche limite. Si ce gradient de pression est suffisamment fort, il peut renverser l'écoulement et provoquer le décollement de la couche limite.

3.8 Absorption de la lumière par les aérosols :

Les propriétés optiques des aérosols sont la cause d'un certain nombre de phénomènes atmosphériques, tels que les halos, les arcs en ciels. Elles provoquent aussi la diminution de la visibilité lors de fortes pollutions particulaires de l'atmosphère. À partir de ces propriétés, il est possible de déterminer la concentration en particules [REN98].

L'action des aérosols sur la lumière peut se traduire par plusieurs effets : l'absorption d'une partie de la lumière, la réflexion ou la diffraction du faisceau. Pour un milieu refermant N particules par unité de volume, il est possible de définir l'absorption du milieu en comparant, intensité I traversant le milieu a L'intensité I_0 de la lumière incidente, par la relation :

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\tau L} \qquad \text{Eq. 63}$$

Avec :

- L l'épaisseur du milieu ;
- τ la turbidité du milieu.

Pour un aérosol mono dispersé de diamètre d_p et de concentration N par unité de volume la turbidité à pour expression :

$$\tau = \frac{\pi N d_P^2 E}{4} \qquad \text{Eq. 64}$$

Où E désigne le coefficient d'absorption d'une particule. Pour de grandes particules E (d>4 µm), E approche avec des oscillations, sa valeur limite de 2,0. Pour des particules comprises entre 0,05 et 4 µm, il n'existe pas d'expression simple de E [HIN82].

4 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons abordé les questions : des impacts sanitaires, écologiques et économiques des poussières issues de la démolition ; d'exploitation des données issues de systèmes optiques ; et les bases théoriques pour l'analyse du flux de particules et sa simulation.
Concernant les impacts sanitaires écologiques et économiques, après avoir fait un inventaire des substances susceptibles d'être présente dans les poussières issues de la démolition, à savoir tous les éléments pouvant être présents dans les aciers, le ciment et la silice sous différentes formes. Nous avons, sur la base des publications scientifiques, décrit les mécanismes d'actions de ces substances, et les éventuelles atteintes qui pouvaient en découler.
Pour les atteintes sur l'environnement, il ressort que les aérosols peuvent avoir : une influence sur le bilan radiatif de la planète ; une influence sur différents écosystèmes ; modifier la chimie de l'atmosphère ; et à l'échelle locale, avoir une influence sur la visibilité et les capacités de photosynthèse des végétaux.
Concernant les aspects sanitaires, il ressort qu'il existe quatre voies d'action : cutané ; stomatologique ; respiratoire ; digestif. Les atteintes semblent dépendre de la quantité totale en contact avec l'une de ces voix. Ces atteintes peuvent être importantes et conduire, pour la silice, à une atteinte auto-immune : la silicose. Des suspicions de lien avec le cancer du poumon existent, mais ne semblent à ce jour pas avérées.
L'aspect économique se limite actuellement au cout de nettoyage et aux charges pesant sur le secteur du BTP par le remboursement de maladies professionnelles. Toutefois si des risques sur la santé et l'environnement étaient clairement mis en lumière ce cout pourrait augmenter et l'image même de la profession pourrait en pâtir.
En l'absence d'informations sur les quantités de poussières en jeu, il est difficile de définir plus précisément ces impacts. Seules des suspicions et des règles de prudence peuvent être énoncées. Il semble que pour les impacts sanitaires les employés représentent une population ou les risques sont plus importants. Sauf pour la silice qui est évacuée très lentement du corps. Dans ce cas même une exposition unique aux poussières pourrait être source de problèmes.
En raison de critères qui seront développés dans la seconde partie, nous avons choisi d'étudier le phénomène à partir de vidéo. C'est pourquoi nous avons exposé les bases théoriques permettant un traitement 2D par la géométrie projective et la corrélation d'image , et un traitement 3D grâce aux relations entre deux vues et aux méthodes de reconstruction automatique basée sur une méthode d'appariement dépendant de la corrélation d'images. Cette section montre les possibilités d'analyse que procurent les mesures vidéo. Par contre, elles se limitent à la surface des objets observés et ne permettent pas de sonder le nuage en profondeur. Les mesures optiques nous livreront un champ de déplacement des objets observés. Dans le cadre du nuage de particules, à condition que la résolution soit suffisamment grande et que la cadence de prise de vue soit

suffisamment élevée, nous pourrons appliquer les outils d'étude de la turbulence, tels que les échelles de longueur, qui nous permettent de déterminer des grandeurs pour utiliser le modèle numérique.

Dans la section de modélisation d'un fluide chargé, nous avons exposé d'une part les bases théoriques nécessaires à la modélisation numérique du phénomène et d'autre part un ensemble d'outils nous permettant d'étudier et d'expliquer certains phénomènes observés.
Plus spécifiquement nous avons présenté la construction du modèle RANS (Reynolds, Average, Navier-Stocks), qui représente une approche statistique de modélisation de la turbulence. Nous avons fait ce choix, car il nous semblait le plus approprié pour la modélisation du phénomène.
Nous avons aussi présenté l'outil descriptif de la turbulence tels que les échelles de turbulence et les différents types de corrélation de la turbulence. Car ces outils peuvent être utilisés dans l'étude vidéo du phénomène et les résultats pourront être utilisés dans le modèle numérique. Nous avons aussi présenté l'expression de la vitesse d'une particule plongée dans un écoulement dans l'objectif de conduire une simulation lagrangienne du phénomène, mais aussi pour pouvoir évaluer les quantités de poussières présentes dans le nuage. Nous parlons de la couche limite dans le but de pouvoir expliciter certains phénomènes observés tels que le décollement. L'absorption de la lumière par les aérosols nous a permis à partir des vidéos de conduire des mesures de concentration en particules.
Dans ce travail bibliographique, nous nous sommes attachés à présenter les connaissances concernant:

- le plan sanitaire écologique et économique ;
- le traitement de l'information ;
- la modélisation d'un fluide chargé.

Car il n'existe pas à ce jour de donnée sur le phénomène étudié. C'est donc une première approche d'étude et il reste donc beaucoup de possibilités d'exploration qui pourront être mises à jour en fonction des développements de l'étude. Ces connaissances seront utilisées comme base de développement des prochains chapitres.

PARTIE 2 : EXPERIMENTAL

Protocole expérimental

Sommaire

1 Définition des types de mesures 89
1.1 Contexte de la mesure 89
1.2 Objectifs de la mesure 90
1.3 Contraintes de la mesure 90
1.4 Choix du dispositif de mesure 92
1.5 Conclusion : 93
2 Protocole expérimental 94
2.1 Protocole global 94
2.2 Protocole des prises d'échantillons pour la mesure de dépôts et de granulométrie 95
2.3 Protocole des mesures vidéo 96
2.4 Traitement de laboratoire 98
2.5 Estimation de la concentration à partir de la prise de vidéo. 100
3 Description des sites de mesures 102
3.1 Mante la jolie 102
3.2 Dammarie les Lys 103
3.3 Mâcon 106
4 Conclusion : 109

Pour comprendre les mécanismes régissant la génération et le transport des particules lors des opérations de foudroyage, il est nécessaire d'obtenir des informations servant de base à la réflexion sur le phénomène. Or il n'existe actuellement aucun protocole de mesures ayant été appliqué à ce type de situations. C'est pourquoi nous avons créé un protocole de mesure.

Ce chapitre présente le protocole créé et mis en oeuvre au cours de notre étude. Il permet de définir le cadre des prises de mesure et leur limite. Pour le concevoir, il a fallu adapter les méthodes de mesures aux sites de démolitions.

Pour cela dans un premier temps, nous avons défini le type de mesures que nous allions conduire. Nous nous sommes intéressés au contexte du chantier, en englobant l'environnement urbain afin de définir les contraintes auxquelles devront s'adapter, aussi bien le protocole, que le matériel de mesure. Puis nous

avons défini les grandeurs que nous désirions mesurer. La confrontation des moyens de mesures aux contraintes nous a permis de faire un choix de matériel.

Dans un second temps, nous exposerons le protocole de mesure. En présentant un protocole global permettant de définir les moyens à mettre en oeuvre pour la mesure, un protocole lié aux mesures de prélèvement sur site et un protocole lié à la prise des vidéos. Puis nous présenterons les principales étapes pour effectuer les traitements en laboratoire et les mesures de concentrations.

Dans un troisième temps, nous présenterons l'ensemble des sites des mesures et leur instrumentation. Nous présenterons successivement le site de Mante la Jolie, Dammaries Les Lys et Mâcon.

1 Définition des types de mesures

1.1 Contexte de la mesure

Dans la plupart des cas, les chantiers de démolition par foudroyage se déroulent dans un environnement urbain dense. Les méthodes de foudroyage ou de semi-foudroyage, de par la verticalité de l'effondrement des bâtiments, sont les seules méthodes pouvant s'adapter dans un tel environnement. Lorsque suffisamment de place est disponible, le basculement des bâtiments est en général préféré. Les périmètres des chantiers sont restreints en dimension (en général 10 mètres autour du bâtiment à démolir) et utilisés par les engins de chantier. Succinctement, le déroulement d'un chantier de démolition au niveau des activités de curage, d'affaiblissement, de démolition et de remise en état du site, peut se découper en plusieurs phases distinctes.

phases	**temps**	**Désignation**
1	H-3mois à H-1jour	Dans cette phase, l'activité du chantier est normale, toutes les voies de circulation du chantier sont utilisées, pour le transport de matériaux et pour la circulation des engins de travail. La vie du quartier se déroule normalement, il n'y a aucune restriction de circulation pour la population en dehors du périmètre du chantier.
2	H-6h à H-1h	La circulation et l'activité du chantier sont très intenses, il est nécessaire de mettre en place le dispositif de protection des bâtiments voisins et d'évacuer les différents matériels du chantier.
3	H-4h à H-1h	Evacuation de la population
4	H-1h à H-10 min	Seul le personnel participant au chantier est autorisé à se déplacer sur le site.
5	H-10 min à H	Seules les personnes habilitées sont autorisées à être dans le périmètre de sécurité.
6	H	Tir
7	H à H+30 min	Un contrôle du bon déroulement du tir est effectué, sur autorisation préfectorale, les pompiers ont le droit de pénétrer sur le site.
8	H+30 min à H+1h30	le personnel du chantier regagne le site pour procéder à la dépose des dispositifs de protection des bâtiments.

9	H+1h30	la population est autorisée à regagner son domicile. Les travaux de remise en état du site commencent.

Tableau 5: Les différentes phases du déroulement d'un chantier

Suivant les sites ces temps peuvent varier ; ils sont définis en accord avec le préfet de la région. Aucune dérogation n'est possible. La population est évacuée en totalité dans un rayon de 150 m pendant une durée de 2 h 30. Le foudroyage d'un bâtiment utilise des quantités d'environ 200 kg d'explosifs, le séquençage des charges est défini de sorte qu'il n'y ait pas plus de 7 kg d'explosif qui soit amorcé en même temps, on parlera de charge instantanée. Le foudroyage, en plus des poussières, projette une importante quantité de débris à des vitesses très importantes. La portée de ces débris peut aller jusqu'à 40 m voir plus. La taille des débris peut atteindre la dimension d'un poing. Selon les informations des entreprises, le nuage de particules se propage dans un rayon compris entre 50 et 300 mètres.

1.2 Objectifs de la mesure

La mesure a pour objectif de définir les principales caractéristiques du phénomène de propagation des poussières de démolition. Pour cela, il est nécessaire de recueillir des informations sur la vitesse de déplacement et sur les propriétés des particules entrainées, telles que la granulométrie et la concentration au cours du temps. Il est aussi nécessaire de recueillir des informations sur la géométrie de l'écoulement, afin de pouvoir caractériser le type d'écoulement. Nous avons fait le choix de mesurer les vitesses de l'écoulement et les propriétés des particules en mouvement.

1.3 Contraintes de la mesure

Afin de garantir le bon déroulement des mesures et pour définir le type de mesures possible, il est important de mettre en relation les contraintes imposées par le système à mesurer et son environnement et les contraintes des méthodes de mesures.

Les contraintes peuvent se diviser en deux groupes. Le premier représente les contraintes liées à l'environnement, qui définissent plus particulièrement les contraintes de la mise en place du matériel. Le second les contraintes liées au phénomène définissent les qualités requises pour les matériels employés.

Les contraintes liées au phénomène sont :

- Le risque de projection, il est d'une part dû à l'explosion des charges qui sont placées à l'intérieur des poteaux et des voiles, et d'autre part dû à la destruction du bâtiment. Même si les éléments minés sont entourés de géotextile pour diminuer ce phénomène, il reste toujours des projections dues à l'explosion. Le risque des projections dû à l'effondrement est

toujours présent. Ce risque exclut pratiquement l'installation de dispositifs de mesure dans un rayon de 40 m autour du bâtiment, sauf s'ils peuvent résister à des chocs répétés ;
- L'onde de pression de l'explosif est difficile à évaluer. Le séquençage des charges est fait de telle sorte qu'il n'y a pas plus de 7 kg de charge instantanée. Nous aurons une succession d'ondes de pression. Les dispositifs de mesures doivent pouvoir y résister ;
- Le rayon de propagation du nuage de particules est selon les acteurs de la démolition, compris dans un intervalle de 50 m à 300 m, le dispositif de mesure doit pouvoir couvrir une grande partie du phénomène ;
- Le nuage de particules en lui-même : le dispositif de mesure doit être insensible à la poussière ;
- La durée du phénomène et sa fréquence, le dispositif doit être fiable.

Les contraintes liées à l'environnement sont :

- L'utilisation du périmètre de chantier par les engins de travaux exclut la possibilité d'installer un dispositif pendant la durée de l'activité du chantier ;
- L'environnement urbain au niveau social et circulatoire exclut la possibilité d'installer un matériel de mesure tant que la population est présente ;
- Le temps de mise en place du dispositif est très court. Le système doit pouvoir s'installer en moins de 3 heures et doit pouvoir être récupéré en moins de 1 heure ;
- Le stress lié au chantier implique que l'installation du dispositif soit la plus simple possible, de sorte qu'il puisse être déployé et récupéré, par n'importe qui ;
- L'encadrement légal contraint très fortement le temps ;
- L'environnement urbain, la disposition des bâtiments et des parcs publics restreignent très fortement les possibilités d'installation. Le dispositif de mesure doit pouvoir être très flexible ;
- Le déplacement du matériel, les dimensions des sites obligent à prévoir l'ensemble du matériel à déplacer. La quantité de matériel pouvant être transportée est limitée par le mode de transport.
- La disponibilité de personnes affectées à la tâche de mesure impose d'être le plus autonome possible.
- Le dispositif doit pouvoir s'utiliser en extérieur par n'importe quel temps.

Quelque soit la mesure envisagée, l'appareillage de mesure doit pouvoir s'adapter à l'ensemble de ces contraintes, c'est-à-dire, il doit pouvoir :

- résister aux projections ;
- résister à la poussière ;
- résister aux fortes variations de pressions ;
- être utilisé en extérieur ;

- couvrir le champ de propagation du nuage (dans le cadre de mesures globales) ;
- être simple d'usage et fiable ;
- s'installer et se récupérer rapidement.

Toutefois à proximité immédiate du bâtiment, le risque lié aux projections et aux explosifs est tel qu'il est inenvisageable d'y disposer des prises de mesure. Nous avons évalué cette distance à un périmètre de 20 m autour du bâtiment.

1.4 Choix du dispositif de mesure

1.4.1 Mesures de vitesses

Il existe deux grandes catégories de dispositif de mesure de vitesses : les méthodes intrusives, et les méthodes non intrusives. Les méthodes intrusives délivrent des informations locales sur l'écoulement, parmi elles nous retrouvons l'anémométrie à fil chaud, les moulinets, les mesures de vitesse pas sondes de pression, les sondes à effet vortex, les pendules anémométriques.

Les méthodes non intrusives peuvent délivrer de l'information locale ou globale. On peut citer la coronographie, la vélocimétrie laser, l'ombroscopie, la strioscopie, l'interférométrie, les mesures par ultra-son, la vélocimétrie par images de particules, la stéréo vélocimétrie par images de particules, l'holographie, la tomographie laser, la spectrométrie, la fluorescence par faisceau d'électrons, la fluorescence laser.

Le choix de la technique de mesure a été effectué en confrontant les différents types de mesures avec les contraintes principales du système. La notation a été volontairement simple en considérant 2 possibilités, apte (1) et non apte (0). Le détail du choix se trouve dans le tableau présent en annexe. Il ressort que les méthodes basées sur l'analyse de vidéos par corrélation d'images sont les plus adaptées à la mesure sur site.

Notre choix s'orientera pour une mesure des vitesses à partir de l'analyse par corrélation d'images, de vidéo prise à cadence normale et à cadence rapide. Ce choix nous permet d'envisager d'effectuer des reconstitutions 3D du déplacement du nuage à condition d'avoir plusieurs angles de vue du phénomène. Nous obtiendrons alors une reconstitution de la surface du nuage.

1.4.2 Mesures des propriétés des poussières :

Pour ce type de mesure, nous sommes obligés d'envisager de disposer les dispositifs dans l'écoulement. Le risque de destruction est donc prédominant. Deux contraintes viennent s'ajouter aux contraintes existantes. En effet, nous n'avons pas d'information sur l'étendue granulométrique du nuage, ni sur la concentration maximum.

Nos principaux critères seront donc l'étendue granulométrique la plus forte possible et la concentration admissible la plus forte possible. Nous avons confronté les méthodes inertielles, électriques, diffusionnelle, mais aussi les compteurs optiques, la corrélation de photon, la CNC l'extinction, la diffractométrie, l'holographie, et les méthodes Doppler à ces contraintes [REN98]. La confrontation se trouve dans le tableau présenté en annexe.

Il ressort qu'aucune de ces méthodes n'est vraiment bien adaptée à ces conditions. C'est pourquoi au regard du risque de destruction du matériel nous avons préféré prélever des échantillons sédimentés pour en faire une analyse granulométrique ultérieure. Ce prélèvement d'échantillon a pour avantages de nous permettre de tracer un profil des dépôts de particules, et il ne nécessite que peu de matériel de faible valeur.

1.5 Conclusion :

Le choix des dispositifs de mesures s'est donc orienté vers des prélèvements d'échantillons sédimentés et vers des prises de vidéo. Ces deux axes ont l'avantage de pouvoir s'installer rapidement et de permettre l'analyse des données en laboratoire. Les prises de vidéo permettront l'estimation des vitesses de déplacement du nuage de particules. Sous certaines conditions, elles permettront une estimation approximative des concentrations en présence dans l'écoulement.

2 Protocole expérimental

2.1 Protocole global

Quel que soit le type de mesures conduites, des étapes préalables sont nécessaires à la préparation du déploiement de ces dernières. Nous avons défini cinq étapes.

Lors de la première, phase un maximum d'informations sur le site, ses alentours et sa préparation pour le jour de la démolition sont collectés. Parmi ces informations, on trouve le plan d'implantation des bâtiments, le plan du périmètre d'évacuation de la population, le plan d'aménagement du site où figure la position : des aménagements de protection, des dispositifs d'atténuation de poussière et les zones éventuellement défrichées. Une prise d'information sur les moyens à disposition sur le chantier le jour du tir est effectuée ainsi que la position des différentes sources d'énergie. Un repérage de l'ensemble du site et de ses différents points de vue est effectué. Lors de ce repérage, des photos sont prises pour d'une part vérifier les points de vue pour les prises vidéo et d'autre part pour bien se rendre compte de la couverture végétale et du nombre de panneaux et réverbères présents dans les angles de prise de vue. Le cheminement de ce repérage est clairement consigné sur un plan afin de permettre une analyse ultérieure. Il est nécessaire lors de cette prise d'information de faire la demande d'autorisation de présence dans la zone évacuée le jour du tir, ainsi que la demande d'une liaison au poste de tir pour avoir le décompte du tir.

Dans un second temps, l'ensemble de ces informations est analysé et complété si des manques sont perçus. Un second repérage est parfois nécessaire. Différents scénarios de déploiement sont prévus de sorte qu'en cas d'imprévu un minimum de points soit déployé de manière à avoir une information correcte. Un rapport est produit ; il comprend les différentes implantations possibles, le matériel nécessaire à prévoir et les moyens humains à mettre en œuvre. Une fois le choix de déploiement validé, les différents dispositifs de mesures sont numérotés et référencés sur un plan d'implantation. Plusieurs copies de ce plan sont faites. Une assurance du matériel de mesure est prise par l'entreprise.

Dans un troisième temps, un marquage des différents points de mesure est effectué sur le site. A ce stade, des modifications du déploiement peuvent encore s'effectuer, car il est difficile de définir correctement un déploiement sur un site en cour de modification profonde. Concernant la position des points de vue, la possibilité d'en avoir plusieurs est conservée. La présence du matériel nécessaire est vérifiée.

Dans un quatrième temps, l'ensemble du matériel de mesure est déplacé sur le site. Les marquages et la présence du matériel sont vérifiés.

Le jour du tir, l'ensemble du dispositif est déployé et après le tir est conditionné et rapporté au laboratoire.

2.2 Protocole des prises d'échantillons pour la mesure de dépôts et de granulométrie

La méthode de prise d'échantillons consiste en un ensemble de bacs pouvant être refermés de manière à pouvoir être transporté. La hauteur des bacs est définie de manière à être le plus faible possible et négligeable au regard de la dimension de l'écoulement. La longueur et la largeur des bacs sont plus importantes que la hauteur. Chaque bac est repéré par un numéro qui figure sur le plan de déploiement. Les bacs sont pesés avant le tir et disposés de manière à ce que le côté le plus long soit a priori dans le sens de l'écoulement moyen. Les bacs sont lestés par une masse glissée dans un sac. Une fois le tir effectué et le nuage de particules dispersé, chaque bac est soigneusement refermé et ramené au laboratoire.

Au laboratoire l'aspect extérieur des bacs est contrôlé, afin de vérifier l'intégrité de l'échantillon. Puis les lestes sont retirés et les éventuelles poussières restées sur le leste sont délicatement brossées. Tous les bacs sont refermés puis pesés.

En raison de la limitation de la plage de mesure du granulomètre laser, la granulométrie se déroule en deux étapes. La première consiste à écrêter l'étendue granulométrique des échantillons à une valeur inférieure à la valeur maximum admissible par le granulomètre laser. Pour ce faire, le procédé de préparation des échantillons et de tamisage a été effectué en conformité avec la norme AFNOR 90. Chaque échantillon a été, séché en étuve, puis pesé. Puis les échantillons ont été passés au travers d'un tamis normalisé de valeur inférieure à la valeur de la limite supérieure du granulomètre laser. Cette valeur est de 630 µm. Pour chaque échantillon, les deux ensembles obtenus sont pesés et conditionnés.

Une fois écrêtée la granulométrie des échantillons est faite à l'aide d'un granulomètre laser conformément à l'ISO99. La procédure a été la même pour chaque échantillon. Dans ce qui suit, nous considérons un échantillon donné. Un bécher adapté au granulomètre laser est rempli d'eau distillée. Une partie de l'échantillon est prélevé à l'aide d'une « cuillère » et dilué dans l'eau distillée. La quantité de l'échantillon à utiliser est définie par le granulomètre. La mesure granulométrique est effectuée sur l'échantillon dilué. Après la granulométrie le bécher de dilution de l'échantillon est versé et rincé plusieurs fois à l'eau distillée. L'échantillon restant est pesé après la granulométrie pour définir la quantité prélevée. Pour chaque échantillon la mesure granulométrique a été effectuée 2 fois.

2.3 Protocole des mesures vidéo

Les vidéos à analyser proviennent soit d'un enregistrement conduit dans le but de l'étude du phénomène (source intérieure) ou d'un enregistrement externe du phénomène. Les informations disponibles sur les réglages de prises de vues sont différentes.

2.3.1 Source extérieure

Les caractéristiques des appareils de prises de vue de cette source ne sont à priori pas connues. Ces vidéos seront utilisées pour des analyses bi dimensionnelles. Il convient d'être attentif à un certain nombre de points qui pourront avoir une influence sur les analyses ultérieures :

- Les distorsions radiale et prismatique de la lentille, si elles sont importantes elles pourront être corrigées en partant du principe qu'un bâtiment est un parallélépipède rectangle ;
- Les dispositifs de correction automatique de luminosité présents en général sur les appareils de prise de vue peuvent, dans le cas d'utilisation de la corrélation d'image, générer des variations de luminosité qui, dans les zones homogènes telles que le ciel, font apparaître des mouvements inexistants. Ces dispositifs ont tendance à faire de fortes corrections de luminosité, car la disparition du bâtiment de l'image change fortement la luminosité de la zone en question. Cet effet ne peut être annulé.

Les informations accessibles directement dans le fichier vidéo sont : la cadence de prise de vue, la résolution du capteur, parfois la focale de l'appareil. Dans la mesure où les géométries observées sont relativement simples et leurs dimensions connues, il est possible de déduire les échelles d'observations.

Remarque : Il est important de vérifier les échelles verticales et horizontales, car suivant les formats, les pixels ne sont pas toujours carrés.

2.3.2 Source intérieure

Pour notre étude, nous avons utilisé des systèmes d'acquisition haute vitesse. Chaque système est constitué d'une caméra monochrome de 1280 x 1024 pixels ayant une cadence de prise de vue pouvant aller jusqu'à 500 images par secondes à pleine résolution. Chaque pixel est codé sur 8 bits soit 256 niveaux de gris. La caméra est reliée à un PC muni d'une carte d'acquisition adaptée. Cette carte sert de mémoire d'enregistrement. Il est possible de faire des enregistrements pouvant aller jusqu'à 6000 images. Cette carte est munie d'une sortie permettant un déclenchement de l'enregistrement à distance via la fermeture d'un contact sec. Le PC permet via un programme adapté de définir la zone du capteur à enregistrer, la cadence de prise de vue, le temps d'ouverture. Un jeu d'objectifs à focale fixe est disponible pour chaque caméra. Chaque dispositif d'acquisition est disposé et monté dans une caisse de transport de sorte que l'installation soit la

plus rapide possible. La puissance électrique du dispositif d'acquisition est de 1 kW. La caisse est équipée d'un onduleur permettant de parer aux éventuelles coupures de courant en cour d'enregistrement.

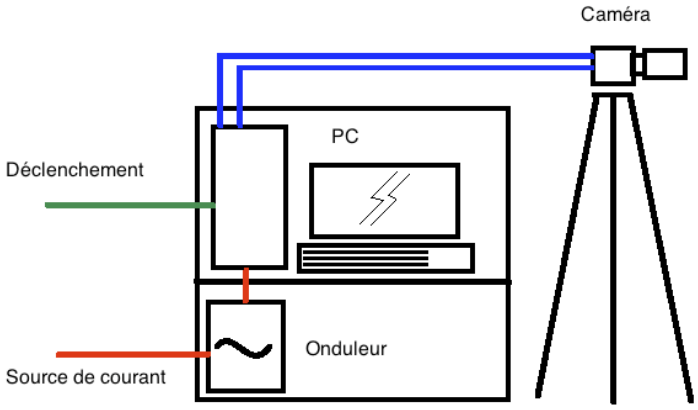


Figure 21: dispositif d'acquisition par vidéo haute vitesse

Sur le terrain, les dispositifs de prises de vues sont installés aux emplacements prédéfinis. Ils sont reliés à une source d'énergie, groupe électrogène relié à la terre. Puis ils sont réglés. Les étapes du réglage sont, dans l'ordre :

- définir la cadence de prise de vue ;
- la mise au point ;
- la profondeur de champ ;
- la luminosité de la caméra en agissant sur la vitesse d'obturation.

Les réglages sont effectués de sorte à ne pas faire apparaître de bruit dû à une trop grande réduction du temps d'ouverture.

La profondeur de champ est la zone perçue nette autour de la zone de mise au point. Trois paramètres influencent la profondeur de champ : la distance de mise au point, la focale et l'ouverture du diaphragme de l'objectif. Plus l'objet sur lequel est effectuée la mise au point est éloigné de l'objectif, plus la profondeur de champ est importante. Plus la focale utilisée est courte, plus la profondeur de champ est importante. Plus le diaphragme est fermé plus la profondeur de champ est importante. Typiquement la profondeur de champ nécessaire a pour ordre de grandeur la 50$^{\text{aine}}$ de mètres.

Remarque : *Il est important de garder à l'esprit que plus la focale est courte et plus l'image sera déformée, de même, plus le diaphragme est fermé et plus la luminosité est faible, entrainant ainsi une intensification du bruit. Concernant la luminosité, nos relevés se font en extérieur et au alentour de 12 h nous ne rencontrerons pas ce problème, nous aurons plutôt tendance à limiter au maximum la luminosité pour éviter la saturation du capteur induite par cette dernière.*

La vitesse d'obturation correspond au temps d'ouverture sur un appareil photo. Plus ce temps est important plus la luminosité est importante. Dans le cas d'un objet en mouvement, un temps d'obturation long entraine une apparition d'une zone floue. Cette zone floue est lié au déplacement durant le temps d'ouverture. Elle est fonction de la vitesse de l'objet et du temps d'obturation.

Remarque : le réglage du diaphragme et du temps d'obturation doit se faire conjointement de sorte à minimiser le flou induit par le mouvement et à garantir une profondeur de champ adaptée au phénomène étudié.

2.4 Traitement de laboratoire

En premier lieu, il est nécessaire de conditionner les données. Les films obtenus, sont décomposé en une succession d'images, en registrer au format Tiff (car non compressé). Il est ensuite nécessaire de vérifier la déformation des images. Dans notre cas elle s'appuie sur l'analyse de la déformation des lignes des bâtiments. Dans la plupart des cas elle est souvent négligeable par rapport à la scène observée. Les échelles de différents objets sont déterminées. Et la pose de la caméra est estimée (dans le cas où la focale et la taille du capteur sont connues).

Vient ensuite une détermination manuelle des principaux mouvements. Cette analyse permettra une configuration des analyses ultérieures et une vérification des résultats de ces dernières. Dans le cadre d'une analyse bidimensionnelle du mouvement, on relèvera les positions successives d'un objet de l'image (bâtiment). Dans le cas d'une analyse tridimensionnelle, on déterminera le déplacement de différent objet entre deux images de points de vue différents. Ce déplacement est dû au changement de points de vue, il est, dans notre cas, plus important pour un objet à proximité et est faible pour un objet au loin.

Une fois les principaux déplacements déterminés, il est possible de procéder à l'analyse par corrélation d'image. Le corrélateur que nous avons développé est basé sur le principe d'auto corrélation d'objets rigides. Pour accroitre la taille du mouvement détectable, nous avons implémenté une analyse multi échelle. La corrélation s'effectue à l'échelle la plus dégradée vers l'échelle la moins dégradée. Les résultats d'une corrélation d'une échelle dégradée servent de base pour le positionnement de la zone de recherche pour la corrélation d'une échelle moins dégradée. Pour configurer le corrélateur, nous avons accès à la définition:

- du nombre de dégradations successives de l'image ;
- de la taille de la zone d'étude ;
- de la taille de la zone de recherche ;
- du décalage de la zone de recherche (pour réduire le nombre de points de corrélation).

Nous avons aussi implémenté différents types de filtres, tels que le filtre de Sobel et de Prewitt. Pour agir sur la détection du déplacement maximum nous pouvons

agir sur deux paramètres : le nombre de dégradations, et la taille de la zone d'étude.

Remarque : L'expérience nous a montré qu'en augmentant le nombre de dégradations de l'image et en réduisant la taille de la zone de recherche à un pixel autour de la zone d'étude, nous diminuons considérablement le temps de corrélation ainsi que la sensibilité au bruit de l'image.

L'analyse par corrélation est vérifiée : en comparent les résultats aux estimations manuelles des mouvements ; et en visionnant le champ de corrélation pour vérifier sa cohérence et le niveau de bruit. Le bruit de corrélation est souvent important dans le ciel. Si les résultats ne sont pas satisfaisants, l'application de filtres sera utilisée sur les images, ainsi qu'une modification des paramètres de corrélation tels que la taille de la zone de recherche.

Une fois la corrélation acceptable nous pouvons passer au post traitement des résultats. Il consiste pour l'analyse 2D à filtrer les résultats et à exploiter certaines zones de l'image, et pour l'analyse 3D à procéder à la reconstruction 3D. Le post traitement s'est principalement articulé sur l'utilisation du langage Python et des librairies associées Matplotib (visualisation), Numpy (traitement de tableau) et Scipy (traitement mathématique). L'ensemble des scripts de postraitement a été codé au fur et à mesure des besoins.

2.4.1 Analyse 2D :

L'analyse 2D permettra de définir les champs de déplacement et donc de vitesses des différentes parties de l'image. Pour l'étude de la démolition, elle permettra le suivi de l'évolution de la hauteur des bâtiments. Mais aussi l'analyse des champs de déformation du bâtiment, pour peu que la résolution de la vidéo soit adaptée. En effet, la corrélation d'image permet d'estimer un mouvement au 10e de pixel voir au 100e de pixel. Pour l'étude du nuage de particules, elle permettra de suivre : l'évolution de ce dernier ; les variations de vitesse en différents points ; et éventuellement les fluctuations de vitesses dues à la turbulence. La précision des informations dépendra essentiellement de la résolution du capteur et des échelles d'observation.

2.4.2 Analyse 3D :

Pour la reconstruction 3D nous avons besoin de connaître la transformation qui permet d'exprimer les points du repère de la 1re caméra dans le repère de la 2nd caméra. Cette transformation peut se décomposer en une translation et une rotation. Les paramètres de translations peuvent être définis grossièrement sur le site en mesurant les distances entre les caméras. Cette orientation peut être affinée en effectuant un calcul de pose des deux caméras par rapport à un objet connu (immeuble) ou par un procédé de stéréo calibration basé sur l'emploi d'une mire de calibration. La stéréo calibration a été effectuée à l'aide de TOOLBOXCALIB. L'expérience nous a montré que la calibration sur une mire

placée à une 10^{aine} de mètre ne permettait pas forcément de faire une bonne reconstruction d'un objet placé à un 100^{aines} de mètres. C'est pour cela que nous avons développé une application permettant de rectifier les paramètres de rotation et de translation.

Cette application permet de faire varier ces paramètres et de voir le résultat final sur trois plans orthogonaux. Ceci permet de faire une vérification des résultats de la reconstruction par rapport au plan des sites de démolition, en prenant les écartements des différents bâtiments visibles comme point de vérification.

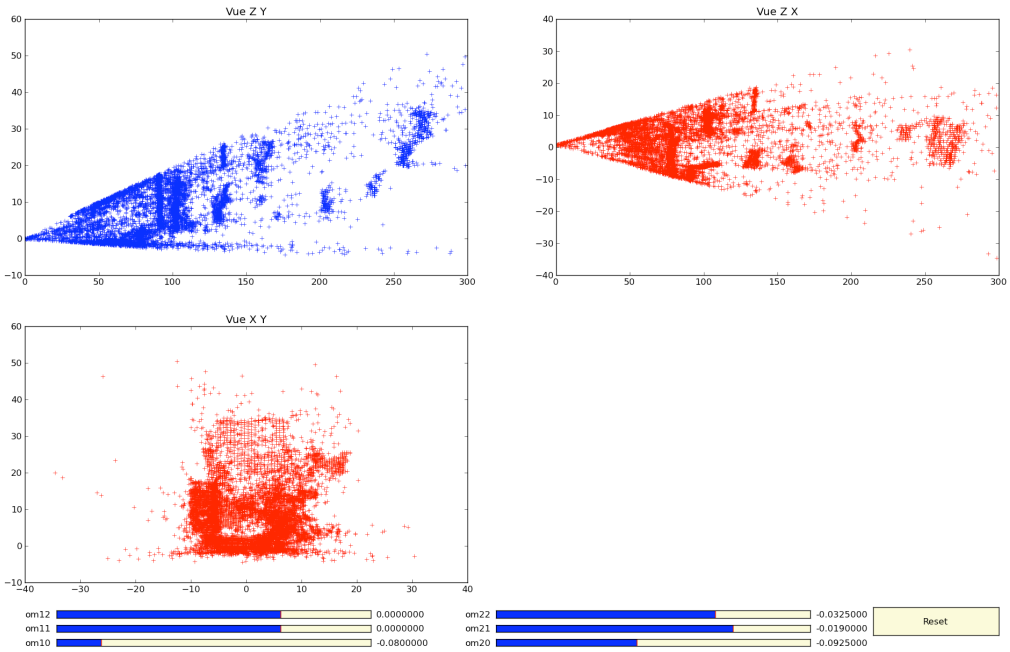


Figure 22: fenêtre d'ajustement des paramètres de rotation et de translation.

La reconstruction 3D se fait en résolvant les systèmes d'équations suivants par la méthode des moindres carrés. Ce système est obtenu grâce à la connaissance de la transformation existant entre les repères des deux caméras. Afin de simplifier le système, nous avons considéré que les distorsions de l'image étaient négligeables. Ce point de vue se justifie par le faite qu'aucune distorsion n'est visible sur l'image.

2.5 Estimation de la concentration à partir de la prise de vidéo.

Comme nous l'avons montré dans le premier chapitre, l'action des aérosols sur la lumière entraine une absorption de la lumière et donc une disparition de certains objets en fonction de l'avancée du nuage. C'est cette particularité que nous avons exploitée pour définir un ordre de grandeur des concentrations en jeu dans le nuage de particules.

Dans notre cas nous faisons l'hypothèse que la distance séparant le front du nuage du point d'observation, absorbe une quantité de lumière négligeable par rapport à la lumière absorbée par le nuage.

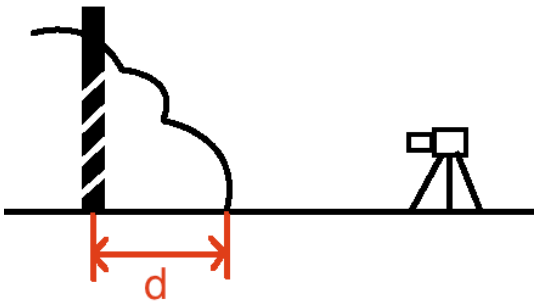


Figure 23: Principe de l'estimation de la concentration du nuage de particule

Selon [REN98] nous pouvons estimer que l'objet a disparu quand il a perdu 95 % de sa luminosité. En faisant une hypothèse sur la composition granulométrique du nuage et relevant la distance d entre le front du nuage et l'objet, nous pouvons estimer une concentration moyenne dans cet intervalle de dimension d. Dans notre cas, nous avons choisi de prendre un aérosol mono dispersé dont la dimension correspond au d_{50}, ce qui a pour conséquence que la valeur de E sera égale à 2. Ceci afin d'avoir une estimation de la concentration probable.

Il ressort que l'estimation de la concentration sera donnée par la relation :

$$0{,}95 = e^{-\tau d} \qquad \text{Eq. 65}$$

Avec :

$$\tau = \frac{\pi N d_p^2}{2} \qquad \text{Eq. 66}$$

3 Description des sites de mesures

Trois sites ont été étudiés. Le site de mante la jolie, où trois tours ont été démolies. Le site de Damarie les lys où deux tours ont été démolies. Le site de Mâcon où 5 bâtiments ont été démolis sur deux ans, deux par basculement et trois par foudroyage.

3.1 Mante la jolie

Ce site est situé sur les bords de la Seine à l'extrémité ouest de la commune de Mante la jolie en Ile de France, près de l'intersection entre le Boulevard de Sully et la rue François Rude. Il est constitué de trois tours (K1, K2, K3). Les trois bâtiments ont été démolis par foudroyage intégral. Les caractéristiques des bâtiments sont présentées dans le tableau suivant. Les dispositifs de protection installés se résument à un merlon de protection le long du bâtiment K1 et à un ensemble de géotextiles déployé sur les façades des bâtiments voisins.

	K1, K3	K2
Longueur en m	31,3	22
Largeur en m	19,5	19,5
Surface au sol en m2	614,25	429
Hauteur (depuis Rdc) en m	52	52
Nb Etages	R+18	R+18
Masse totale en T	13650	9600
Minage	Rdc 1er 5e 9e 13e	Rdc 1er 5e 9e 13e

Tableau 6: Caractéristiques des bâtiments du site de mante la jolie

Le site a pour avantage d'être plan, ce qui permet d'avoir de bons points de vue. La démolition a été filmée depuis la rive opposée d'un canal séparant le site de la Seine. Le film a pour avantage d'être pris de manière quasi parallèle aux façades des bâtiments, et d'être suffisamment éloigné pour présenter une vue globale de la scène. La vidéo a été prise à une cadence de prise de vue de 25 images par secondes. Sa résolution est de 720 pixels sur l'horizontale de l'image et 580 pixels sur la verticale de l'image. Les pixels de cette vidéo sont rectangulaires, le plus long côté étant orienté suivant l'horizontale. Cela nous donne pour le bâtiment K1 une échelle verticale de 0,14 m/px et une échelle horizontale de 0,15 m/px. Ce tir a été effectué avant le démarrage du projet de recherche.

Figure 24 : Implantation des bâtiments, dispositif de protection, et de prise de vue pour le site de mante la jolie

3.2 Dammarie les Lys

Ce site est constitué de deux tours, 251 et 261, situés dans la plaine du lys au croisement de l'avenue marcel Pouvreau et la rue Jean Moulin. Elles seront démolies par semi-foudroyage. Le tableau ci-dessus donne une description des deux bâtiments. Pour cette démolition l'ensemble des garages accolés aux bâtiments a été détruit, les sous-sols ont été découverts. C'est pourquoi ils ont été mentionnés dans le tableau suivant. En raison de l'épaisseur des murs, ils n'ont pas été minés. La hauteur a toutefois été donnée depuis le rez-de-chaussée et non du sous-sol.

	251	261
Longueur en m	22,3	20,8
Largeur en m	18,9	18,9
Surface au sol en m2	372	344
Hauteur (depuis Rdc) en m	46,75	44
Nb Etages	SS+R+16	SS+R+15
Masse totale en T sans SS	8450	7400
Minage	Rdc 1er 5e 9e 13e	Rdc 1er 4e 8e 12e

Tableau 7: Caractéristiques des bâtiments du site de Damarie-Les-Lys

Des merlons de protection dépassant de 3 m le niveau du rez-de-chaussée ont été installés. Des géotextiles ont été déployés sur les façades des bâtiments les plus proches. De plus pour tenter d'atténuer la propagation des particules des piscines de 3x3 m2 posées sur un explosif ont été disposées autour des bâtiments. Au moment du tir les explosifs des piscines ont été amorcés provoquant ainsi une projection de l'eau contenue dans ces piscines.

La photo ci-dessous décrit l'ensemble de l'aménagement de protection et d'atténuations de poussière mis en œuvre pour ce site. Le décaissage est délimité par la zone violette, les merlons érigés figurent en brun, les géotextiles sont en vert et les positions des piscines sont figurées en bleu.

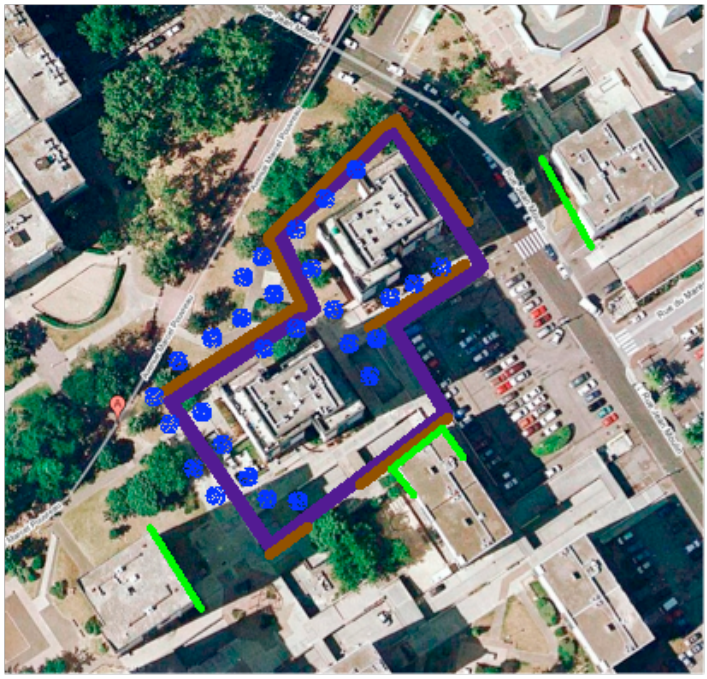


Figure 25 dispositif de protection et d'atténuation de poussière de Damarie-Les-Lys

Ce site a grande densité de population présente de grandes différences de niveau, due au différent aménagement urbain (garages, talus pour parc verdoyant…) une grande densité de végétation entoure les deux bâtiments. L'ensemble de ces points nous a contraints à déployer les sondes de prélèvement en tenant compte de la morphologie du site. Les angles de prise de vues à cause de la végétation sont restreints.

Les axes de prises d'échantillons et les points de prise de vue sont présentés sur la figure suivante. Pour des raisons de clarté, nous n'avons pas présenté le détail de la répartition des prises de mesures sur une ligne, car cette réparation sera donnée dans l'analyse des résultats. La prise de vue 1 a été effectuée à l'aide d'une caméra ayant une résolution de 720 px sur l'horizontale et 580 px sur la verticale, à une cadence de 25 images par secondes. La prise de vue 2 a été effectuée à l'ide d'une caméra ayant une résolution de 640 px sur l'horizontale et 480 px sur la verticale, à une cadence de 23 images par secondes.

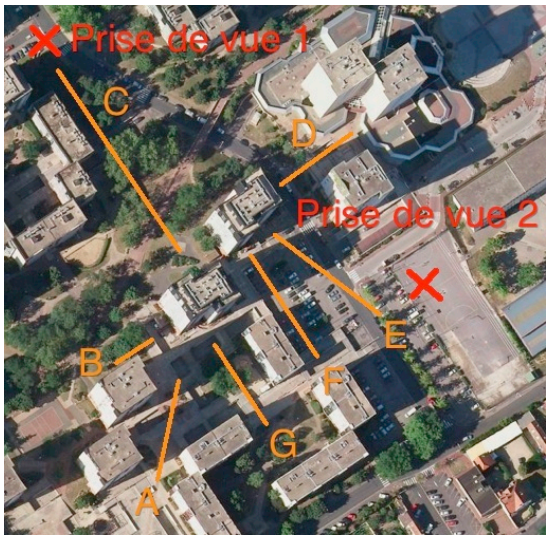


Figure 26: implantation des prises de mesure de prélèvement et de dépôt du site de Damarie-Les-Lys

3.3 Mâcon

Ce site regroupe la destruction de 5 bâtiments sur deux ans, trois la première année et deux la suivante. La première année, les trois bâtiments démolis étaient des tours, deux ont été démolis par la technique du basculement et une par la technique du foudroyage (repère 1 sur la figure). La seconde année deux bâtiments ont été démolis par foudroyage, l'un était une barre et l'autre une tour (repère 4 sur la figure).

	1	4
Longueur en m	20	20
Largeur en m	20	20
Surface au sol en m2	400	400
Hauteur (depuis Rdc) en m	50	50
Nb Etages	R+16	R+16
Masse totale en T	8000	8000
Minage	Rdc 1er 4e 8e 12e 15e	Rdc 1er 4e 8e 12e

Tableau 8: Caractéristiques des bâtiments du site de Mâcon

Les aménagements ont consisté à creuser une tranchée de 3 m de profondeur le long du bâtiment 1 (en rouge), cette tranchée a pour objectif de réduire la propagation d'une onde de surface. Un ensemble de merlons de 3 m de hauteur a été érigé (en brun sur la figure), principalement pour réduire l'étalement du tas, mais aussi dans les cas du bâtiment 2 pour s'assurer de la bonne destruction du bâtiment. Des géotextiles ont été déployés pour protéger les façades voisines (bleu pour la première année et vert pour la seconde).

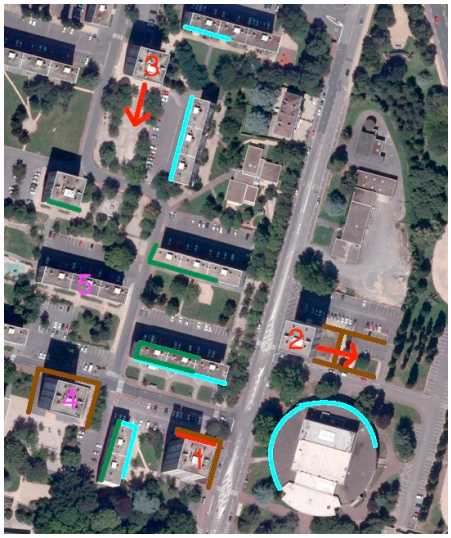


Figure 27: position des différents bâtiments avec leur direction de chute pour le cas des basculements et positions des différents éléments de protection pour le site de Mâcon.

Ce site malgré la densité des constructions présente de larges dégagements d'une 50aine de mètres. De plus, il est plan. Toutefois, la végétation recouvre de larges zones, bien délimitées.

La première année des prises d'échantillons ont été effectuées sur les tours 1 et 2. Le mode de déploiement des prises d'échantillons a suivi un maillage carré de 10 m de coté, raffiné à un maillage rectangulaire de 5 m par 10 aux abords des bâtiments. Le raffinement concerne la direction normale au bâtiment. La zone de prélèvement d'échantillons est délimitée par le contour bleu sur la figure… Les premiers films hautes vitesses ont été faits à l'aide de deux caméras mises à disposition par l'entreprise Photon lines. Ces caméras avaient une résolution de 1280 par 1024 pixels en noir et blanc codés sur 8 bits (soit 256 niveaux de gris). La première était munie d'un objectif de 6,5 mm et était cadencée à 1000 images par secondes, la seconde était munie d'un objectif de 12,5 mm et était cadencée a une vitesse de 500 images par secondes. La position des caméras correspond au carré rose sur la Figure 28.

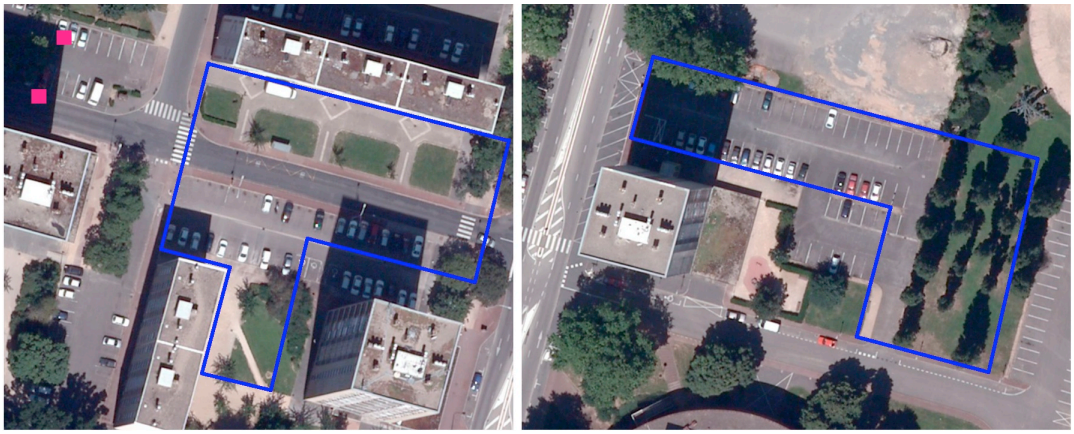


Figure 28: positions de zones de relevé en bleu et des caméras en rose. Site de Mâcon première année.

La seconde année, en raison des aménagements de protection et de la végétation, seuls des relevés vidéo ont été effectués. Ils ont été de deux types, haute vitesse et vitesse normale.

Les relevés vidéo haute vitesse ont été effectués à l'aide du système d'acquisition vidéo (décrit plus haut) ayant une résolution de 1280 par 1024 pixels. Les deux caméras ont été placées à 1,2 m l'une de l'autre. La cadence de prise de vue a été de 200 images par secondes. La focale utilisée a été de 60 mm. La distance au bâtiment est de 80 m, ce qui avec la focale et la taille du capteur permet de déterminer la taille de la fenêtre d'observation. À cette distance elle est d'une 50 aines de mètres.

La figure suivante décrit la position des prises de vues. En bleu la prise de vue à cadence normale, en violet les prises de vues à cadence rapide.

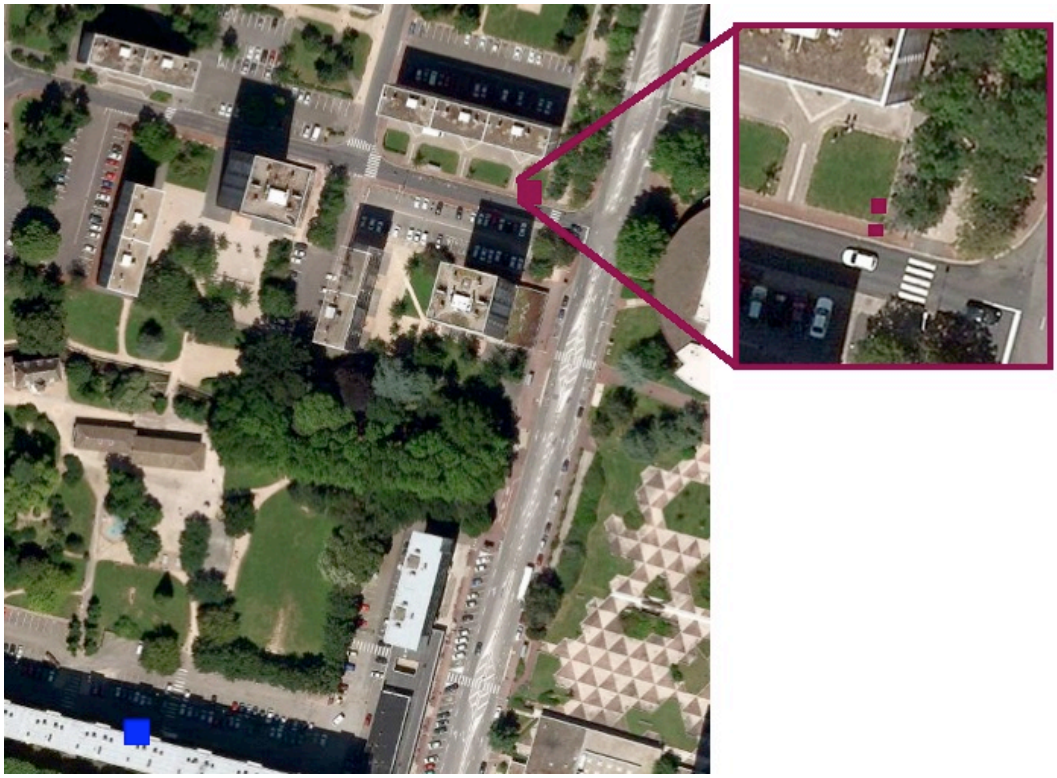


Figure 29: position des caméras haute vitesse en violet et à vitesse standard en bleu. Site de Mâcon deuxième année.

4 Conclusion :

Dans le but de comprendre les mécanismes régissant la génération et le transport des particules lors des démolitions par foudroyage. Nous avons décidé de faire des mesures visant à caractériser le phénomène, d'un point de vue qualitatif et quantitatif. Or à ce jour il n'existe aucun protocole pouvant s'adapter à ce genre de phénomène. C'est pourquoi nous avons été amenés à définir une approche originale permettant la mesure du phénomène.

Dans un premier temps, nous vous avons présenté la méthodologie que nous avons employée pour définir les moyens à mettre en œuvre. Cette méthodologie s'est articulée autour de la définition de contraintes du système, et des aptitudes de différent matériel.

Dans un second temps, nous avons présenté l'ensemble du protocole définit aussi bien pour la récupération des donnés, que pour leur analyse. Tant pour les prises d'échantillons, que pour les prises vidéo. L'originalité de l'approche réside en l'emploi de stéréo vidéogramétrie haute vitesse pour l'étude d'un écoulement multiphasique.

Pour finir, nous vous avons présenté les trois sites étudiés afin de montrer la stratégie de déploiement des prises de mesure.

Il est important de garder à l'esprit que le cadre de ces mesures est fortement contraint par le phénomène à proprement parler, mais aussi par l'environnement du chantier. C'est pourquoi dans le cadre des mesures par dépôts nous avons été amenés à faire des choix qui ne sont pas forcément optimaux par rapport au phénomène. Tout au long de notre étude, nous avons été amenés à faire le choix de privilégier l'acquisition de donnée, car la fréquence des démolitions n'est pas très importante.

Aujourd'hui nous avons acquis des données qui permettent d'une part d'envisager d'autres types de mesure, notamment pour la concentration de l'écoulement, mais aussi d'autre part de nous conforter dans les choix de notre approche, notamment par l'étude 3D de l'écoulement.

Ce chapitre nous a donc permis de définir et de conduire les différentes mesures que nous avons réalisées. Les résultats sont exposés dans le chapitre suivant.

Résultats expérimentaux

Sommaire

1 Mesures de prélèvement : 113
1.1 Répartition du dépôt : 113
1.2 Granulométrie : 119
1.3 Analyse chimique : 120
2 Mesure vidéo : 122
2.1 Effondrement des bâtiments : 122
2.2 Dynamique du nuage 130
2.3 Forme générale du jet : 134
2.4 Mesure de concentration : 135
2.5 Structures turbulentes au cours du temps 137
2.6 Aspiration 137
2.7 Fluctuation de vitesse 141
3 3D 144
4 Discussion: 147
4.1 Etude globale du processus de démolition : 147
4.2 Dynamique du nuage 157
5 Conclusion : 162

Classiquement pour qualifier un écoulement multiphasique on cherchera à définir des caractéristiques telles que la nature des particules, leur granulométrie, les vitesses de propagation, les profils de dépôts, les champs de concentration, les éventuelles variations de pression et de température, les échelles de turbulences, etc. Sur la base du protocole expérimental exposé dans le chapitre précédent, nous avons conduit un ensemble de mesure visant à définir l'écoulement et les mécanismes de création de particules.

L'objet de ce chapitre est de présenter les différentes mesures effectuées ainsi que les conclusions qu'elles ont induites. Il se décompose en deux grandes parties, la première qui expose les résultats de mesures, la seconde qui amène aux différentes conclusions.

Dans un premier temps, nous présentons les différents résultats obtenus à l'aide des mesures par prélèvements d'échantillons. En commençant par la répartition

du dépôt de poussières, puis la granulométrie de celles-ci et pour finir la composition chimique.

Dans un second temps, nous exposons les différents résultats issus des mesures vidéo. En commençant par la dynamique de chute des bâtiments, source du mouvement du nuage, puis la dynamique du mouvement du nuage. Ce qui nous amènera à la forme générale du jet de particules, qui associée à la dynamique de chute et la granulométrie des particules nous permettra d'exposer les mesures de concentrations. Nous présenterons ensuite l'évolution des structures turbulentes au cours du temps ainsi que l'aspiration du bâtiment et les mesures de fluctuation de vitesses.

Dans un troisième temps, nous exposerons les premiers résultats des mesures 3D qui se restreignent pour le moment à une simple reconstruction 3D de la scène à différents instants.

Dans un quatrième temps, nous présenterons nos principales conclusions tant sur le processus global de démolition et ses liens avec la production de particules, que sur la dynamique du nuage et les raisons de son mouvement.

Pour finir, nous exposerons nos principales conclusions sur le phénomène et exposerons les perspectives que nous pouvons envisager, sur les mesures à conduire ainsi que sur les moyens de les conduire.

1 Mesures de prélèvement :

1.1 Répartition du dépôt :

1.1.1 Site de Dammarie-les-Lys :

La Figure 30 représente la répartition du dépôt en fonction de la distance à un mur de bâtiment pour le site de Dammarie-Les-Lys. Le dépôt est exprimé en g/m^2 et la distance en mètre. Le point de référence de la distance est le mur le plus proche dans l'axe de la ligne de mesure.

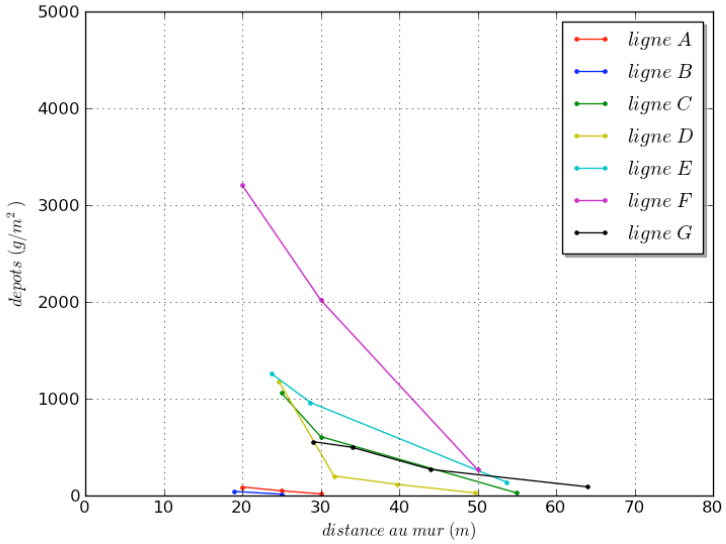


Figure 30: profils de dépôts en g/m^2 pour les différentes lignes de prélèvement du site de Dammarie-les-Lys.

Pendant les premières secondes, le nuage se déplace rapidement sous l'effet du mouvement induit par la démolition. Puis le nuage reste en place pendant plusieurs minutes. Il a alors la forme d'un dôme qui semble homogène et qui est centré sur les bâtiments démolis. Il subit alors deux phénomènes : il se disperse sous l'action de la diffusion et est entrainé par le vent. On peut supposer que le dépôt est dû principalement à la seconde phase qui dure une 10$^{\text{aine}}$ de minutes alors que la première phase ne dure que 6 secondes. Le vent était orienté du bâtiment 261 vers le bâtiment 251. Les photos suivantes montrent pour un autre site de démolitions que le nuage de particule semble bien se répartir dans un dôme centré sur le bâtiment.

Figure 31 : répartition du nuage de particules autour du bâtiment au bout de 7 secondes.

Analyse des courbes :

Les 7 lignes décrites dans le protocole expérimental sont représentées sur la Figure 30. L'allure de ces courbes suggère une décroissance en exponentielle en fonction de la distance au bâtiment. Le niveau maximum relevé dépasse les 3 kg par m^2 à 20 mètres. Au-delà de 60 m, il n'y a pratiquement plus de dépôts ce qui suggère que le nuage de particules n'a pas dépassé cette distance, sauf pour la ligne G. Il semble que pour cette ligne, le flux a été canalisé par les bâtiments alentour provoquant ainsi une plus grande avancée. Nous pouvons distinguer 3 principaux groupes :

- le premier constitué par les courbes des lignes C, D, E, G : Les lignes G et C ont un profil de dépôts très similaire. Ceci semble être dû au fait que ces deux lignes sont représentatives du flux généré par le bâtiment 261. Toutefois, la ligne G tend à montrer une distance de propagation plus

importante pour le nuage de particules. Ceci est probablement dû au fait que la disposition des bâtiments voisins a canalisé le flux dans la direction de cette ligne. Les lignes E et D appartiennent au bâtiment 251. Malgré leur apparente différence, il est à noter que le niveau maximum est très semblable, ce n'est que par la suite que les deux lignes diffèrent. Cette différence est due à la présence de bâtiments qui ont dévié le flux ;

- le second, constitué de la courbe F. Au vu de la position de cette ligne de prélèvement, il semble que le niveau de dépôts soit dû au fait que localement le flux empoussiéré des deux bâtiments se soit ajouté. Ainsi, la concentration en particules a dû très fortement augmenter ;

- le dernier constitué des courbes A et B : Le niveau de ces courbes montre un dépôt très faible. La faiblesse de ce dépôt peut être expliquée par deux phénomènes conjoints. Le premier : des garages souterrains donnant sur le site de démolition ont canalisé une partie du flux. Le second : le vent venait de cette direction et aucun obstacle s'opposant au mouvement du nuage n'était présent. De ce fait le nuage de particule a été balayé très rapidement empêchant de même une partie du processus de dépôts ;

Evaluation du dépôt total :

L'évaluation de la quantité du dépôt total a pour objectif de nous donner un ordre de grandeur de la quantité de poussières produites afin de pouvoir initialiser un premier calcul numérique.

Dans un premier temps, nous avons abordé l'évaluation du dépôt en considérant qu'il résultait de la superposition de deux profils gaussiens centrés sur chaque bâtiment. Pour faire cette hypothèse de répartition, nous avons considéré que le dépôt était nul à l'infini et qu'il était maximum au centre de chaque bâtiment. L'hypothèse que le dépôt est maximum au centre de chaque bâtiment vient de la répartition du nuage. Il recouvre chaque bâtiment. Comme le nuage atteint une distance maximum beaucoup de particules ne sont pas entraînées loin du bâtiment. Les courbes de Gauss ont été définies grâce au principe de la régression logistique.

$$z = c.Exp\left(\frac{-0{,}5\left(x-u\right)^2}{t^2}\right)$$

$$u = -\left(\frac{b_1}{2b_2}\right); t = \left(\frac{1}{\sqrt{-2b_2}}\right); c = Exp\left(b_0 + b_1 u + b_2 u^2\right) \qquad \text{Eq. 67}$$

Les résultats de ces régressions sont consignés dans le tableau suivant :

paramètres	*D, I*	*G*	*F*
u	1,38	0	0
t	21,10	25,04	19,46
c	4154	2730	4170

Tableau 9 : paramètres pour l'estimation du dépôt total.

Il ressort de ces interpolations que le dépôt obtenu total obtenu pour les courbes (D, I) et G est de 21 tonnes et pour le couple (D, I) et F est de 25 Tonnes.

Une autre manière dévaluer ce dépôt est d'utiliser les fonctions de régression RBF (Fonctions Radiales de Bases). Le dépôt total obtenu, pour l'ensemble de la zone est de 13 Tonnes. L'allure du dépôt, déduit de la répartition des points de mesure, sur la zone, est présentée sur la Figure 32.

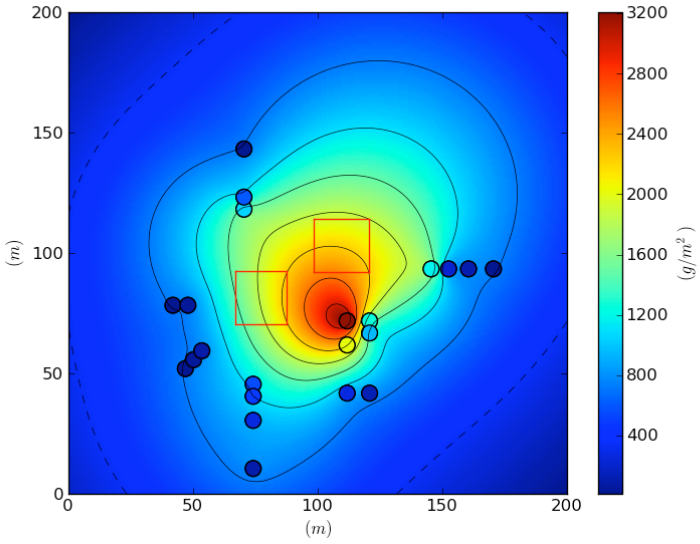


Figure 32 : interpolation RBF pour l'ensemble des points mesuré.

La répartition des points de mesures est représentée par des cercles dont la couleur dépend du dépôt mesuré. Les carrés rouges représentent la position des bâtiments démolis. La disposition des bâtiments implique que les jets des bâtiments se sont croisés en deux endroits : au niveau des lignes E et F ; ainsi qu'au niveau de la ligne C. Par rapport à leur bâtiment respectif les lignes E et C sont dans le même axe, les valeurs de dépôts sont comparables. Il est donc raisonnable de penser que si une ligne de prélèvement avait été présente à côté de la ligne C de sorte à correspondre à la configuration des lignes E et F, elle aurait donné un résultat comparable à la ligne F. Cette ligne étant absente, l'interpolation ne peut en rendre compte. C'est pourquoi cette évaluation du dépôt par ce type d'interpolation est une évaluation que l'on peut qualifiée minimum.

Sur la base des observations précédentes et en créant des points dont les valeurs sont déduites du rapport entre les points de lignes E et F, nous obtenons pour ce

type d'interpolation, un dépôt de 17 Tonnes et une repartions présentée a titre indicatif, sur la Figure 33. Ce résultat nous montre que le nombre de points de mesure doit être important pour réduire au maximum l'amplitude des résultats possibles. C'est pourquoi pour le site de Mâcon 1 nous avions pris la décision d'augmenter significativement le nombre de points de mesures.

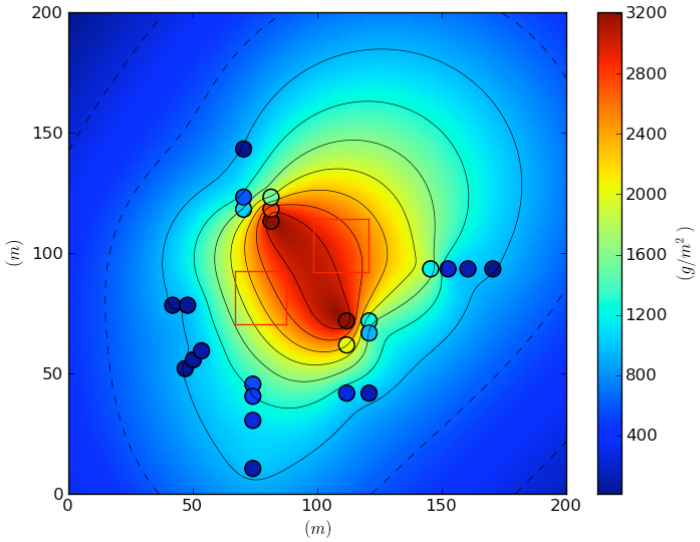


Figure 33 : interpolation RBF avec un ajout de points

Avec ces deux méthodes d'estimation du dépôt, nous avons donc un encadrement du dépôt total supposé pour ce site. Il pourrait être compris entre 25 et 13 tonnes sur une surface de 22 500 m^2. Ce qui correspond en ordre de grandeur a des mesures effectuées sur d'autres sites par le CEBTP.

Cet encadrement de la quantité totale déposée nous renseigne sur la quantité totale de particules présente dans le nuage. En effet si on considère que le dépôt est dû à la seconde phase, si l'on considère la hauteur du nuage 30 m ainsi que la granulométrie des particules on se rend compte qu'il n'y a finalement que très peu de quantité de matière qui a pu se déposer.

1.1.2 Site de mâcon 1

En raison de la forte activité du chantier, un grand nombre de prises de mesure ont été détruites par le passage d'engin. C'est pourquoi nous ne pouvons montrer plus de résultats sur ce site. Toutefois, les profils de dépôts sont similaires à ceux retrouvés sur le site de Dammarie-Les-Lys, tant en allure qu'en niveau.

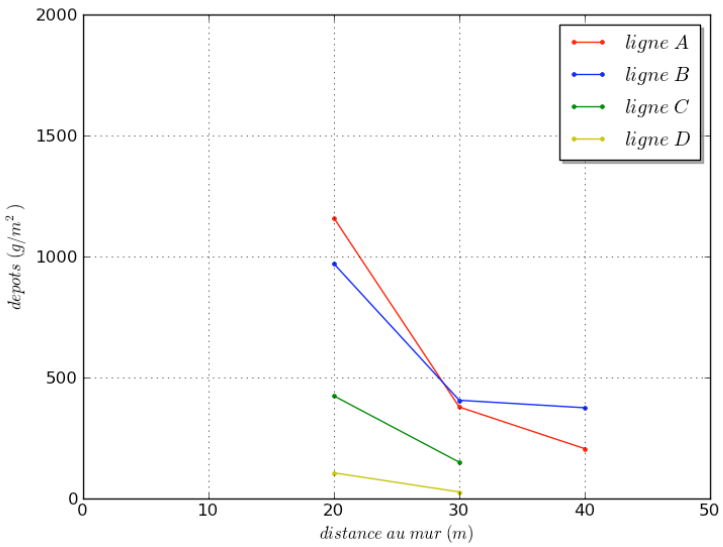


Figure 34: profils de dépôts en g/m^2 pour les différentes lignes de prélèvement du site de Mâcon 1

1.2 Granulométrie :

La granulométrie des échantillons du site de Dammarie-les-Lys a été effectuée dans le but de permettre : une caractérisation des effets sanitaires des poussières ; une estimation des vitesses des vitesses de sédimentation ; et de servir de base pour une simulation numérique.

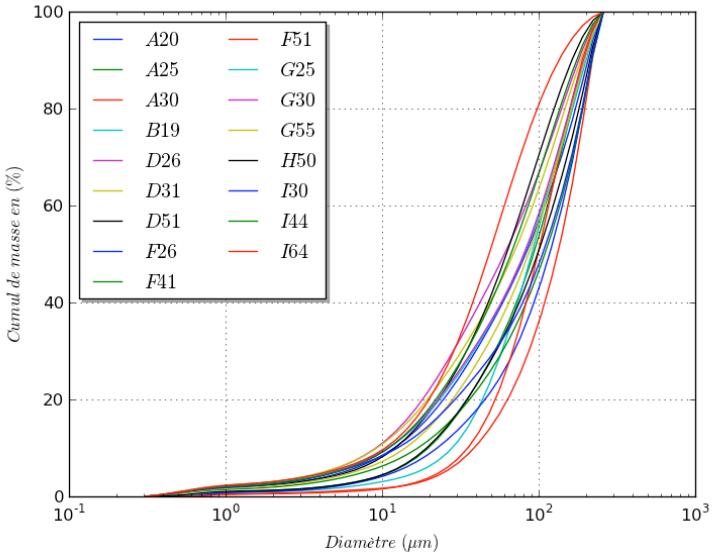


Figure 35 : Courbes granulométriques cumulées pour différents points de mesures du site de Dammarie-les-Lys

La Figure 35 nous présente le pourcentage de masse cumulé en fonction du diamètre de la particule, pour les différents points de mesure. Nous pouvons voire que les échantillons on une granulométrie allant de 0,3 µm 300 µm. Le D_{50} est compris entre 40 µm et 150 µm.

En observant la distribution granulométrique des échantillons (Figure 36), on peut s'apercevoir que les maximums granulométriques se répartissent en trois classes qui se chevauchent. Ces classes sont représentées dans le Tableau 10.

Granulométrie la plus forte	Étendue relevée
220 µm	De 25 m à 40 m
160 µm	De 30 m à 55 m
140 µm	De 45 m à 60 m

Tableau 10 : Classes granulométriques

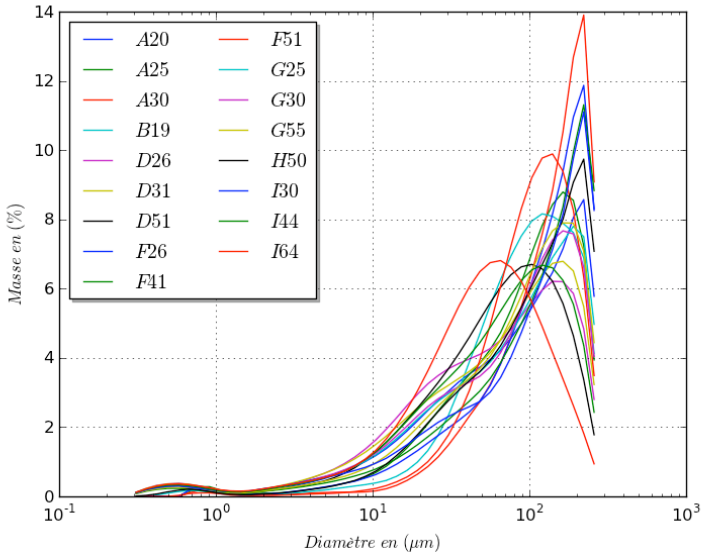


Figure 36 : distribution granulométrique des échantillons pour différents points de mesures. Site de Dammarie-les-Lys.

1.3 Analyse chimique :

Cette analyse a été conduite à titre indicatif afin de vérifier la cohérence de l'estimation de la composition des bétons effectuée dans la synthèse bibliographique. Un ensemble d'échantillons a été analysé par MEBX. Cette analyse permet de détecter la présence d'élément dont la fraction massique est supérieure à 1 %. Cette analyse a mis en évidence la présence de : C, O, Mg, Al, Si, S, K, Ca, Fe (Figure 37). Ce qui correspond globalement à la composition des bétons armés. La photo suivante (Figure 38) présente une accumulation de fibres d'etringites.

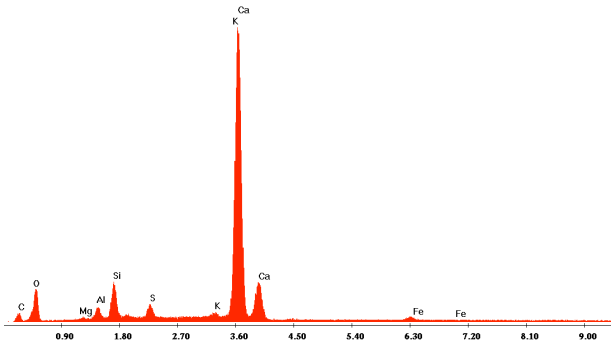


Figure 37 : résultat par analyse MEBX. Site de Dammarie-Les-Lys.

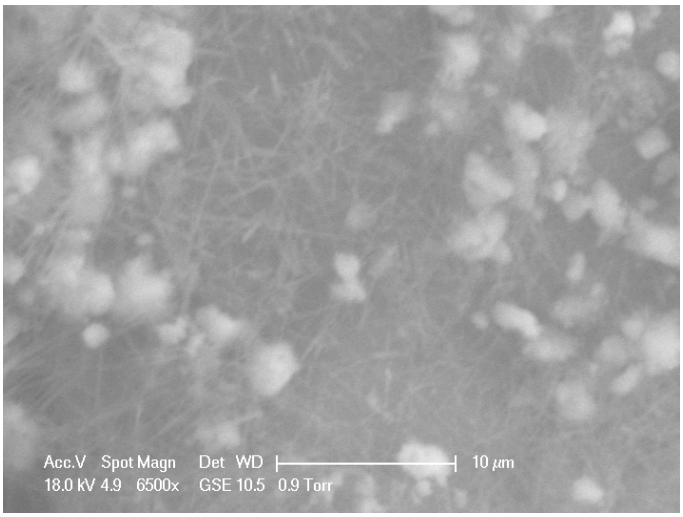


Figure 38 : fibres d'étringite. Site de Dammarie-Les-Lys.

2 Mesure vidéo :

2.1 Effondrement des bâtiments :

Dans cette section nous allons présenter les résultats relatifs au mouvement des bâtiments. Ces résultats ont été obtenus pour leur grande majorité grâce à la corrélation d'images. La cohérence des résultats a été confrontée à différents relevés manuels. Toutefois, en raison, d'une part du nuage de particule et d'autre part des fumées d'explosif, certaines de ces analyses on du être faite manuellement, car ces deux aspects masquent partiellement certaines zones a différents moments, comme l'illustre les photos suivantes (Figure 39).

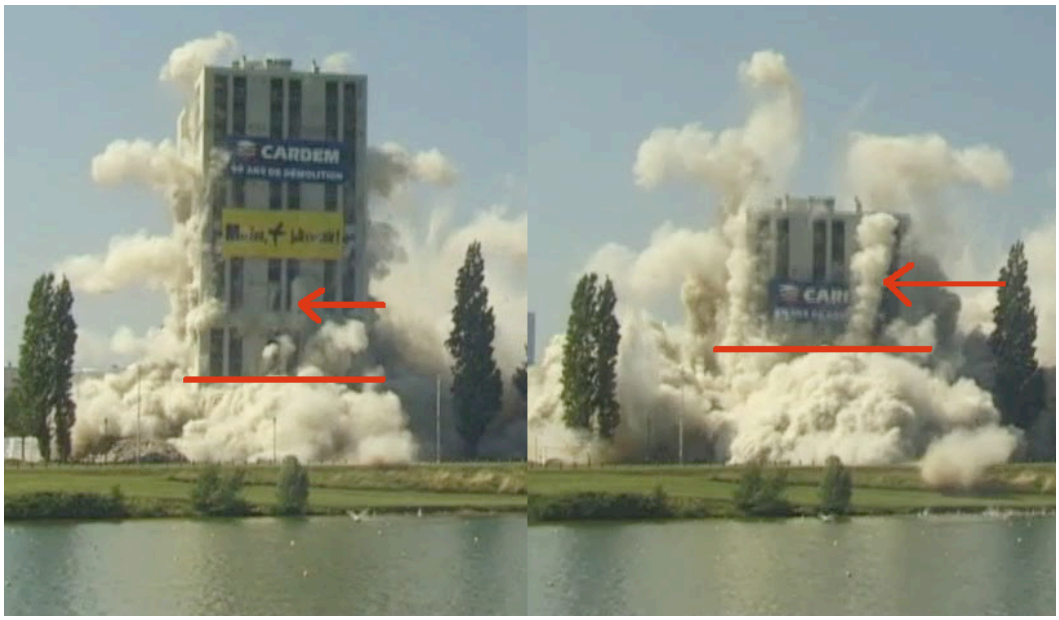


Figure 39 : zones masquées par le nuage de particules et les fumées d'explosif. Site de Mante la Jolie.

Dans ces conditions, il peut être difficile d'effectuer un traitement global automatisé et il peut être nécessaire de procéder à une restriction importante des zones à étudier par la corrélation d'images ou, au moins au niveau du post traitement. Alors qu'un traitement manuel permet d'extraire des informations là où un traitement automatisé ne le peut, du fait de la manière dont fonctionne le traitement corrélatoire. En effet la corrélation cherche à apparier des zones entre elles alors que notre système de vue et d'analyse, lui, a une compréhension de l'objet et peut par déduction identifier un pixel précis ou un faible groupe de pixel.

Dans un second temps, nous présenterons à l'aide des résultats obtenus une façon de mettre en forme le problème de l'effondrement d'un bâtiment. Et nous définirons ainsi le problème dans sa globalité. Tout en laissant une place suffisante à des questions soupçonnées, mais non mesurée. Nous présenterons

aussi la manière dont nous pouvons envisager un modèle simplifié de créations de particules.

2.1.1 Position des bâtiments au cours du temps

Les caractéristiques des bâtiments étudiés ainsi que la manière dont ils ont été minés ont été présentées dans le protocole expérimental. De cette description, nous pouvons retenir que plus un bâtiment est haut plus il est lourd.

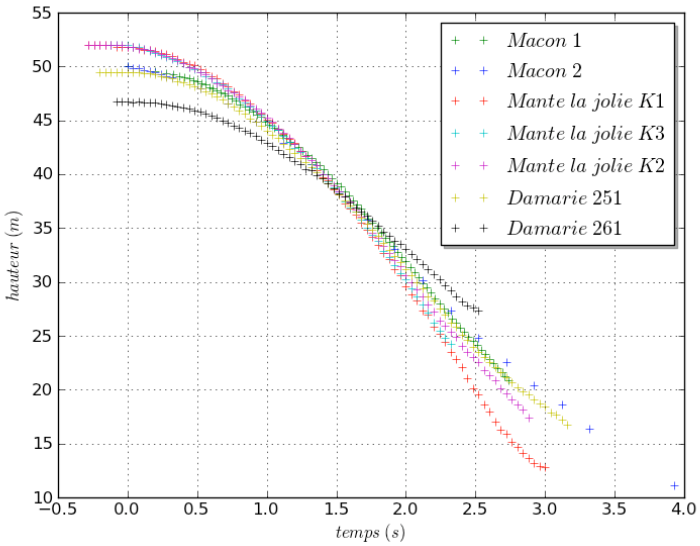


Figure 40 : évolution de la hauteur des bâtiments au cours de leur effondrement

Ce graphique représente l'évolution de la hauteur de sept bâtiments au cours de leurs effondrements. Chaque courbe a été obtenue en moyennant le déplacement d'une ligne horizontale appartenant au bâtiment considéré. Dans un premier temps, nous nous sommes assuré que la déformation du bâtiment est homogène suivant l'horizontale. Dans un second temps, nous avons procédé à la détermination des échelles verticales et de leur éventuelle variation suivant l'axe horizontal, en prenants appuis sur les concepts de la géométrie projective. La ligne a été choisie de sorte à pouvoir être suivie le plus longtemps possible. Pour de nombreux bâtiments, elle ne représente qu'une fraction de la largeur d'une façade, car les fumées d'explosif viennent cacher le déplacement du bâtiment. Le déplacement a été évalué à l'aide de la corrélation d'image.

Nous pouvons, en fonction de leurs allures, regrouper les différentes courbes en 4 groupes :

- Le premier composé des bâtiments K1 et K3. Ces bâtiments sont identiques et ont eu le même minage.
- Le second composé du bâtiment K2. Ce bâtiment, à section carrée, est plus léger que les bâtiments K1 et K2 qui ont une section rectangulaire. Il

est plus proche au niveau de sa structure des bâtiments du site de Mâcon, mais il est par contre plus haut.

- Le troisième, constitué des bâtiments de Mâcon 1 et 2 et du bâtiment 251 de Dammarie-Les-Lys. Au niveau de leur construction, les bâtiments de Mâcon sont identiques, par contre leur minage a légèrement différé. En effet pour le bâtiment de Mâcon 1, un étage de plus a été miné par rapport au bâtiment de Mâcon 2. Ce point peut expliquer que la courbe de Mâcon 2 se décale de celle de Mâcon 1 vers la fin du mouvement et tende à aboutir à une démolition plus longue. Le bâtiment Dammarie 251 est très différent de la forme des bâtiments de Mâcon. Toutefois si l'on compare les masses par étage nous pouvons nous rendre compte qu'ils sont très similaires. Le minage sur ce bâtiment a été effectué comme pour le site de Mâcon 1. Les hauteurs de ces deux bâtiments sont très proches. L'ensemble de ces points permet d'expliquer pourquoi les courbes de Mâcon 1 et Dammarie 251 se superposent bien.

- Le dernier constitué du bâtiment Dammarie 261. C'est le bâtiment démoli le plus petit. Sa masse par étage est la plus faible. C'est pourquoi sa position au cours du temps s'écarte le plus du bâtiment 251.

De cette analyse nous pouvons dégager trois critères influençant la forme des courbes d'effondrements : la hauteur initiale ; la masse par étage et le nombre d'étages miné. De façon générale, plus la hauteur, la masse par étage et le nombre d'étages miné sont grands et plus leur variation de hauteur au cours du temps est importante.

Chaque courbe à l'allure d'une fonction logistique, on y distingue une phase d'accélération et une phase de décélération en fin d'effondrement. Pendant 0,16 seconde, ce qui correspond à l'intervalle de minages de deux étages, la phase d'accélération est représentative d'une chute libre. Par contre pour la suite du mouvement ce n'est plus le cas. Le ralentissement en fin de mouvement est très certainement dû au fait que la masse du bâtiment a si fortement diminué, qu'elle ne permet plus de rendre les forces de déformation négligeable devant l'action de la pesanteur. Une analyse énergétique du système viendra étayer cette hypothèse.

2.1.2 Déformation du bâtiment

Ce graphique nous présente l'évolution au cours de l'effondrement de l'écart entre différents points du bâtiment 251 de Dammarie-les-Lys. En raison des fumées d'explosif et des jets du dispositif d'abattage, ce graphique a été obtenu par un relevé manuel, car la corrélation d'image était trop perturbée par ces phénomènes.

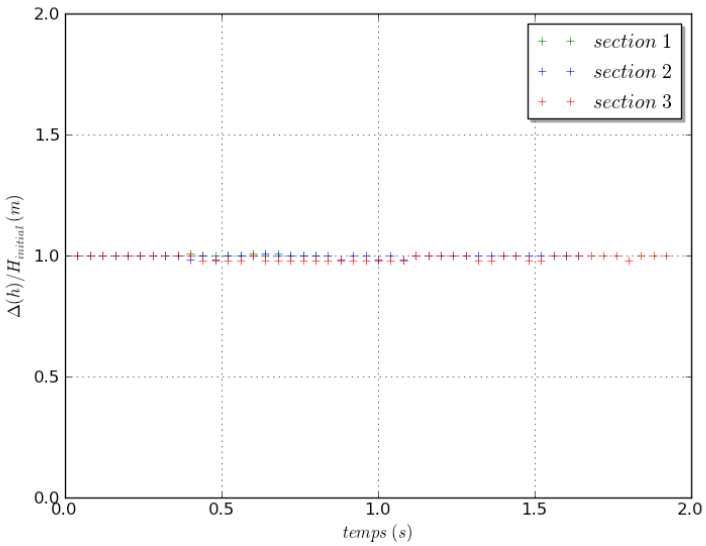


Figure 41 : évolution de l'écart de différents points du bâtiment 251 de Dammarie-les-Lys

Nous pouvons voir que l'écart entre les différents points reste constant au cours du temps. Ceci nous indique que la déformation verticale du bâtiment est concentrée dans les étages inférieurs de l'édifice en cour d'effondrement. Cette déformation ne se propage pas dans la hauteur du bâtiment malgré le fait que certains étages supérieurs aient été minés. Nous pouvons dire que le bâtiment se déforme et se détruit par le bas. Les particules sont donc produites dans cette zone de forte déformation. Il n'est pas possible de correctement évaluer la zone de déformation, car elle est cachée par l'éjection du nuage de particules.

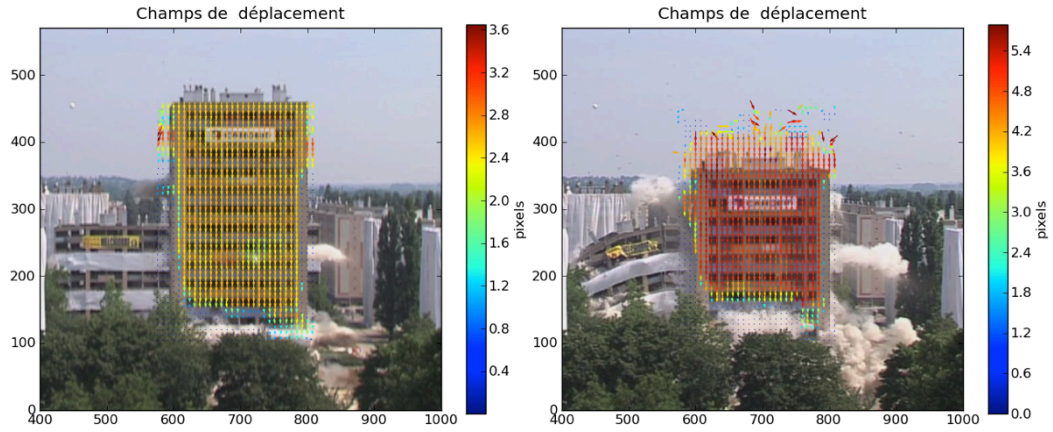


Figure 42 : visualisation du champ de déplacement obtenu par corrélation d'images du bâtiment de Mâcon 2. Le champ de déplacement est uniforme.

Cette image issue de la corrélation d'image nous présente le champ de déplacement pour deux instants différents du bâtiment Mâcon 2. L'ensemble des unités est exprimé en pixels. Cette représentation nous montre que ce champ de déplacement est uniforme sur toute la hauteur du bâtiment au cours du temps. Comme le champ de déformation est relié aux champs de déplacement par l'intermédiaire du gradient de la transformation, et que le champ de déplacement est uniforme alors le champ de déformation est nul.

2.1.3 Hauteur des tas :

La hauteur des tas a été déterminée soit par mesure sur site soit à l'aide de photographie où des éléments de tailles connues servent d'échelle de mesure. Les résultats de ces mesures sont donnés dans le tableau suivant.

Bâtiment	Hauteur mesurée en m
Dammarie 261	10,25 m
Dammarie 251	9,65 m
Mâcon 1	6,7 m
Mâcon 2	11,2 m
K1	11,5 m
K2	11,5 m
K3	11,5 m

Tableau 11 : hauteur des différents tas après l'effondrement des bâtiments

En comparant la hauteur des tas de gravats à la hauteur des bâtiments respectifs, on peut s'apercevoir que leur hauteur représente 22 % de la hauteur initiale du bâtiment, sauf pour le bâtiment de Mâcon 1. Cette différence est due au fait qu'il y avait une tranchée de 3 m de profondeur à 1 m du bâtiment (cf plan). A la fin de la démolition, les étages supérieurs du bâtiment ont basculé vers ce fossé. Ainsi, les gravats se sont répartis dans le fossé, provoquant ainsi un étalement plus grand du tas.

A la fin de la démolition, les bâtiments sont réduits en tas de gravats. La forme des tas est semblable à celle d'un cône dont la pointe aurait été coupée, formant ainsi une zone plane dont la dimension est de l'ordre de grandeur de la surface au sol du bâtiment. Les blocs formant le tas ont un ordre de grandeur compris entre la taille des poussières relevées et le mètre. L'angle de talutage est d'environ 32°.

Figure 43 : allure typique d'un tas (bâtiment 251 Dammarie-les-Lys)

2.1.4 Adimensionnalisation des courbes de démolition,

L'adimensionnalisation d'un problème a pour avantage de permettre son étude en s'affranchissant des questions de dimension et en le définissant à un facteur d'échelle près. Ce qui a pour principal avantage de trouver des règles de similitudes entre différentes situations ainsi que de définir des critères de comparaison adaptée.

L'évolution de la hauteur des bâtiments a été adimensionnalisée par rapport à la hauteur initiale du bâtiment concerné. Le temps a été adimensionnalisé par rapport au temps de chute du bâtiment. L'estimation du temps de chute des bâtiments nécessite de connaître l'instant initial du mouvement des bâtiments et l'instant final. Comme il n'a pas été possible de coupler une horloge sur le séquenceur de tir nous n'avons pas eu la possibilité d'avoir un instant de mise à feu précis. De plus, du fait du séquençage de la mise à feu des charges, l'instant de mise à feu initiale ne correspond pas forcément avec le début du mouvement. Même s'il est a priori possible de déterminer, à partir de l'instant de mise à feu initial et du séquençage des charges, le moment où tous les éléments de soutiens d'un étage sont détruits, rien ne garantit dans les faits que les détonateurs vont effectivement déclencher la charge au moment ou ils devraient la déclencher. En plus, tous les éléments d'un étage ne sont pas forcement détruit, mais ils sont en si petit nombre que leur influence sur le mouvement peut être négligés.

Toutefois, pour définir l'instant initial du mouvement il nous est possible d'utiliser deux méthodes complémentaires. La première, lors de la mise à feu des explosifs ils dégagent un gaz de combustion qui va venir déformer les géotextiles enrobant le bas du bâtiment. En raison de la vitesse de déplacement de ces gaz et

de la faible distance séparant les murs du géotextile, on peut considérer que l'instant où le géotextile commence à se déformer est l'instant initial du mouvement. La seconde consiste faire la différence entre la courbe de position du bâtiment et une courbe décrivant la chute libre d'un objet lâché de la hauteur du bâtiment considéré. Cette différence ne peut pas être négative, et au début du mouvement le bâtiment suit a priori une loi de mouvement très proche de la chute libre. La détermination de l'instant initial revient à minimiser la différence de ces deux courbes aux premiers instants du mouvement.

L'instant final ne peut pas être connu pas cette méthode et ne peut être définis directement, car le nuage de poussière vient à cacher la fin du mouvement. Il faut faire une extrapolation du mouvement, entre la dernière position connue et la position finale, celle du tas de gravats. Entre ces deux positions, il a été considéré que le bâtiment est suffisamment déstructuré pour que ses éléments finissent leur chute en suivant la chute libre. L'ensemble des temps de chute totaux est référencé dans le Tableau 12:

Bâtiment	**Temps de chute estimé**
Damarie 261	3,4 s
Damarie 251	3,7 s
Mâcon 1	3,5 s
Mâcon 2	3,8 s
K1	3,3 s
K2	3,5 s
K3	3,4 s

Tableau 12 : temps de chutes estimé

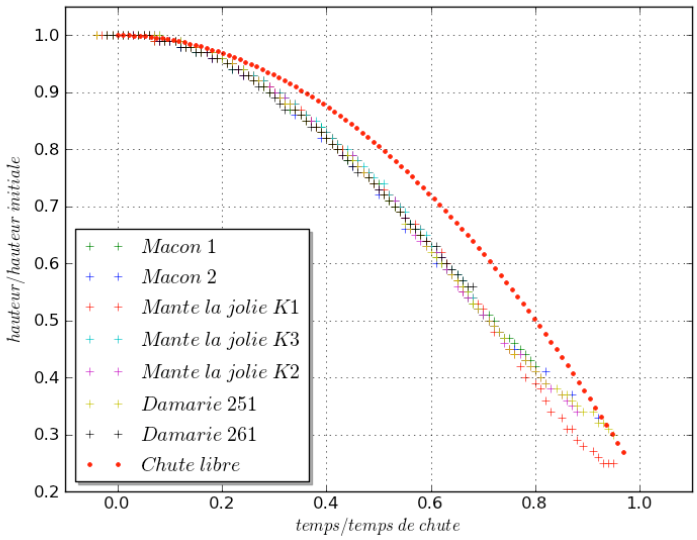


Figure 44 : adimensionnalisation des courbes de positions des bâtiments

Nous pouvons voir qu'une fois les relevés des positions successives, des bâtiments, adimensionnalisés, ils se superposent correctement. Même si toutefois quelques écarts subsistent.

L'hétérogénéité des bâtiments et la diversité des temps de chutes ne permettent pas de déterminer avec ces données un temps de chute à priori. Nous pouvons tout au plus définir un temps de chute minimum défini par la chute libre.

2.1.5 Mise en équation des courbes de chutes :

L'hypothèse principale de cette mise en équation est qu'en aucun cas la variation de position d'un bâtiment ne peut être plus rapide que la variation d'un objet en chute libre lâché depuis la hauteur initiale du bâtiment.

Cette hypothèse a pour conséquence que notre équation ne donnera jamais une solution impliquant une accélération supérieure à la gravité. En partant de ce point, nous avons fait la différence entre la courbe décrivant la position d'un solide en chute libre et la courbe décrivant l'effondrement d'un bâtiment. Cette différence est nécessairement positive ou égale à zéro. L'allure de cette différence est de type exponentiel. Une fois l'équation de cette différence déterminée il ne reste plus qu'à la rajouter à l'équation d'un solide en chute libre. Au final, l'équation du déplacement des bâtiments étudié prend la forme :

$$x = H - \frac{1}{2} g t^2 + Exp\left(A \ln(t) + B\right) \qquad \text{Eq. 68}$$

Le tableau suivant regroupe les valeurs des coefficients A et B pour les différents bâtiments étudiés.

Bâtiment	A	B
Damarie 261	3,592	— 1,531
Damarie 251	2,294	0,337
Mâcon 1	3,877	— 1,803
Mâcon 2	3,245	— 0,858
K1	5,488	— 4,198
K2	4,229	— 2,700
K3	4,352	— 2,470

Tableau 13 : termes A et B correspondant à l'équation de mouvement Eq. 68

Le terme en exponentielle est représentatif de la déformation, fracturation et perte de masse du bâtiment, ainsi que tout autre processus dissipatif. Il semble que le mécanisme le plus prépondérant est la perte de masse du bâtiment, en effet c'est le seul mécanisme qui agit sur la source du mouvement.

2.2 Dynamique du nuage

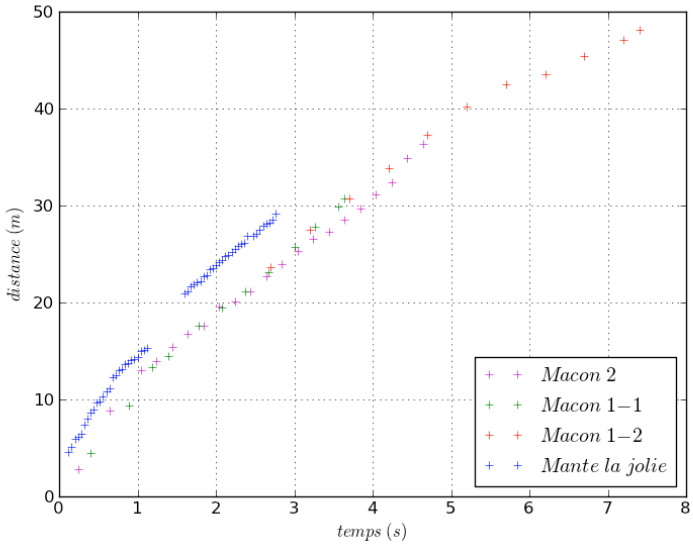


Figure 45: position successive du front du nuage pour 3 bâtiments, Mâcon 1, Mâcon2, et Damarie-Les-Lys.

Ce graphique nous montre l'évolution de la position du front du nuage pour différents bâtiments. Le relevé de Mante la Jolie est interrompu en raison de la présence d'un peuplier dans le champ de vision. Nous pouvons remarquer que pour deux bâtiments identique au niveau de la construction et très similaire au niveau de la dynamique de chute, la progression du nuage est la même. Il est à noter que la propagation du nuage semble se décomposer en 3 étapes. La première de 0 à 1,5 seconde, dans cette phase le nuage est principalement propulsé par les effets de l'explosif, dans cette phase le nuage parcours une 15aine de mètre en 1,5 seconde. La seconde de 1,5 s à 5,5 s où le nuage parcourt une trentaine de mètres à une vitesse qui semble constante. Et la dernière à partir de 5,5 s où le déplacement se ralentit fortement.

Si l'on adimensionnalise ces courbes avec les paramètres d'adimensionnalisation des courbes de déplacement du bâtiment. Nous pouvons nous apercevoir que les différents relevés de position se superposent convenablement. Nous pouvons donc en conclure que les variables qui gouvernent l'effondrement du bâtiment gouvernent aussi le mouvement du nuage de particules. Nous pouvons aussi voir que le mouvement à vitesse constante du nuage dépasse largement le temps de chute du bâtiment.

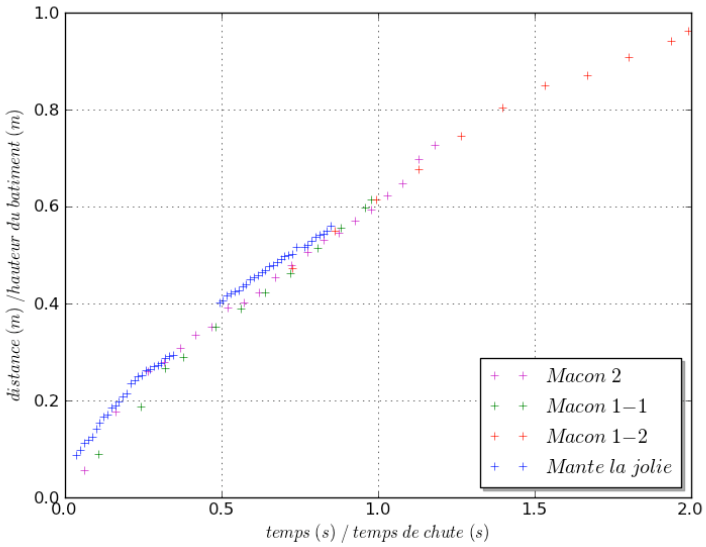


Figure 46: Adimensionnalisation des positions successives du front du nuage pour les 3 courbes de la Figure 45

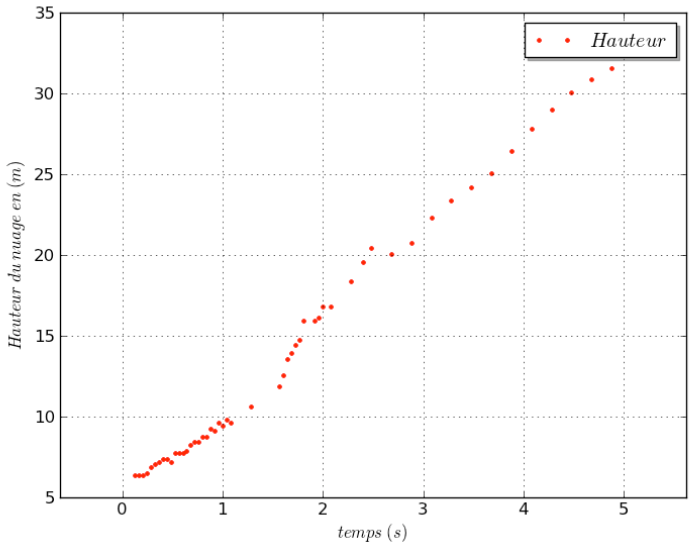


Figure 47: hauteur du nuage de particules au cours du temps pour bâtiment K1 et Mante la Jolie.

Ce graphique nous montre l'évolution de la hauteur du jet au cours du temps pour le bâtiment K1 du site de Mante la Jolie. La hauteur initiale est de 6 m ce qui correspond presque à la hauteur de deux étages (5,5 m). Ce relevé peut être séparé en deux parties, la première de 0 à 1,5 s et la seconde de 1,5 s à 5 s. La hauteur dans la première partie semble croitre plus lentement que dans la seconde. Le découpage de l'évolution de la hauteur correspond au découpage de l'évolution du front du nuage. En effet dans les tout premiers instants le jet se déplace principalement suivant l'horizontale. Puis au fur et à mesure son mouvement vers la verticale va tendre à augmenter alors que son mouvement suivant l'horizontale va tendre à diminuer, pour finalement atteindre, dans la seconde partie une évolution de forme qui sera stable suivant l'horizontale et la verticale. Ceci s'explique par le fait que la première partie du mouvement est due

à l'effet des explosifs, qui par la leur réaction produisent 720 litres de gaz par kg d'explosif. Le mouvement du jet qui parcourra les 50 m suivra la progression de hauteur de la deuxième partie. Dans ce cas, sa hauteur extrapolée à l'instant t=0 est de 4,7m.

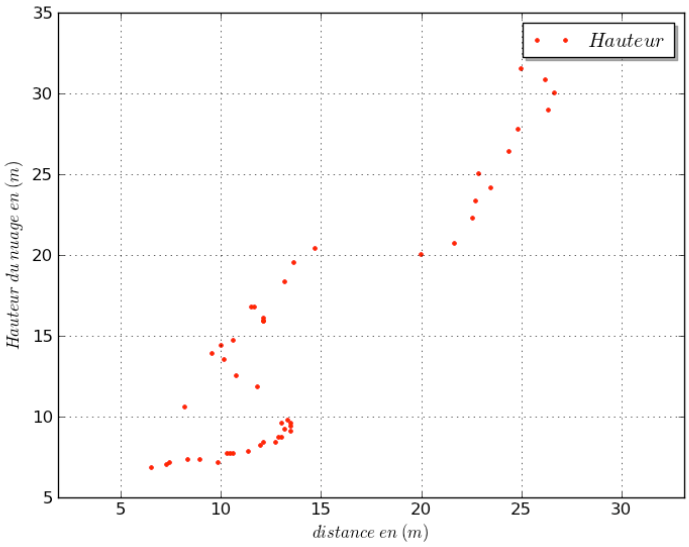


Figure 48: position successive du point le plus haut du nuage de particule, à partir de la paroi de l'immeuble K1.

Ce graphique nous montre les positions successives du point le plus haut. Nous pouvons voire qu'il y a deux zones distinctes la première correspond au mouvement induit par l'explosif, la seconde au mouvement du jet à proprement parlé. L'irrégularité de positionnement dans la seconde partie est due à la difficulté d'identifier clairement l'abscisse du point le plus haut.

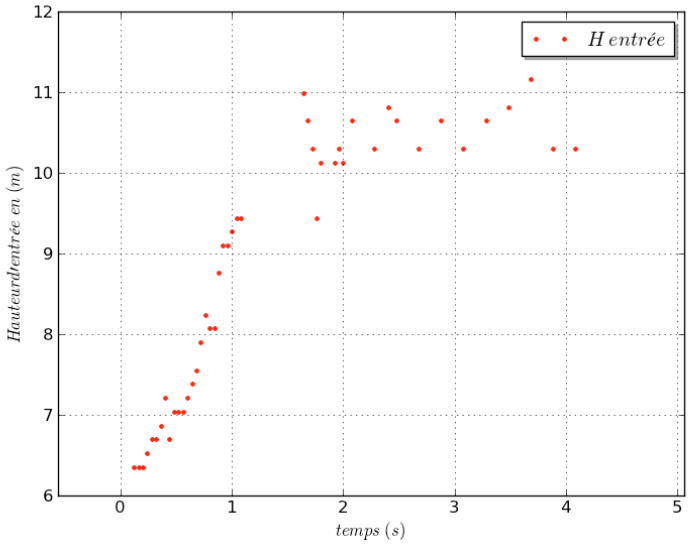


Figure 49 : Hauteur d'entrée du nuage relevé le long de la paroi de l'immeuble.

Ce graphique nous montre l'évolution de la hauteur du point d'entrée au cours du temps. La hauteur d'entrée augmente de 0 à 2 secondes pour passer de 6 m à

10 m, puis elle est globalement stable pour le reste du temps. L'augmentation de la hauteur d'éjection peut s'expliquer par deux points :

- Au cours du temps un tas va se former sous le bloc en mouvement, élevant ainsi le niveau initial ;
- Une plus grande zone est en cour de destruction.

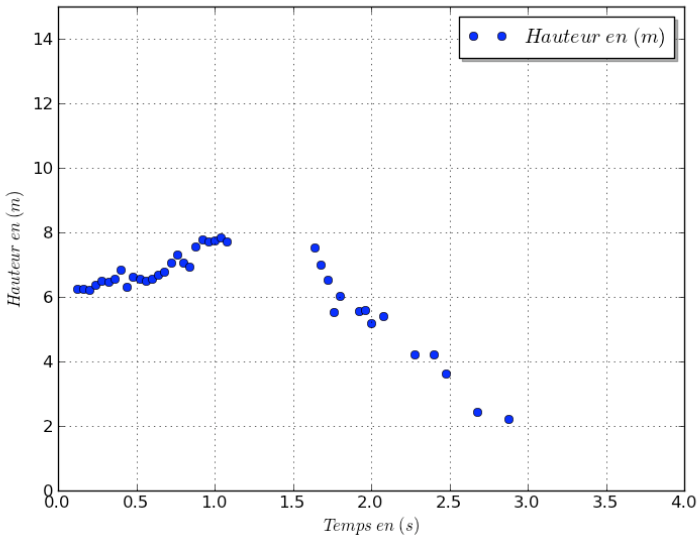


Figure 50: Evolution de la hauteur d'entrée retranchée de la hauteur supposée du tas.

Ce graphique représente l'évolution de la hauteur d'entrée du nuage moins l'évolution de la hauteur du tas. L'évolution de la hauteur du tas est supposée inversement proportionnelle à la variation de hauteur du bâtiment.

Il permet de montrer qu'à priori l'évolution de la hauteur du tas ne peut pas expliquer totalement l'augmentation de la hauteur d'injection montrée précédemment. Il semble que la zone en cours de destruction ait tendance à augmenter de 0 s à 1,5 s, puis à décroitre et atteindre zéro entre 3 s et 3,5 s. Ce dernier point peut servir pour l'évaluation de la durée d'effondrement.

2.3 Forme générale du jet :

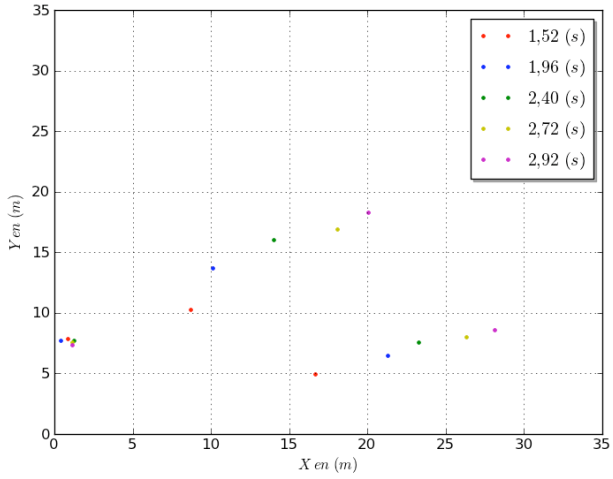


Figure 51 : Forme latérale du jet à différentes distances. Site de Mante la Jolie.

Ce graphique nous montre l'évolution de la forme latérale du jet pour différents instants. Les points relevés ont été le point d'entrée, de points le plus haut et le point le plus avancé. L'angle de développement vertical du jet est d'environ 30° sauf pour les points relevés à 1,52 seconde où l'angle est environ de 20°. Ceci s'explique par le fait que dans les premiers instants le nuage de particule se propage à l'horizontale puis commence à se déployer verticalement. En raison du fait que dans les premiers instants le nuage de particules a été masqué par les fumées d'explosif, il n'a pas été possible de quantifier l'évolution de l'ouverture de ce jet. Toutefois, nous pouvons voir qu'au bout de 1,9 seconde le jet semble avoir une évolution de forme stable jusqu'au décollement qui intervient approximativement au bout de 4,5 secondes.

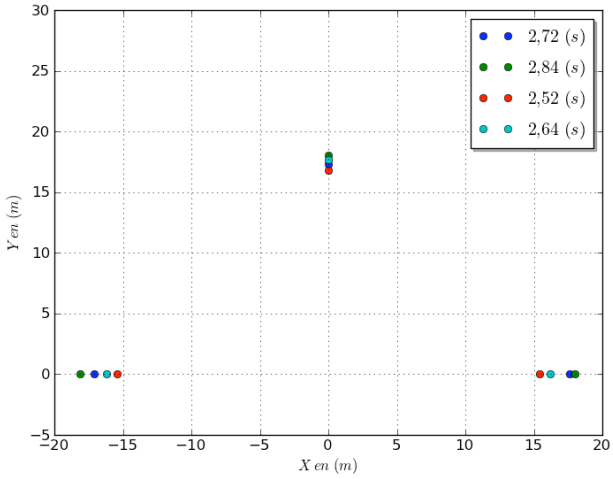


Figure 52 : Forme du jet vue de face à différents instants. Site de Mante la Jolie.

Ce graphique nous montre la forme du jet vue de face pour différent instant. Nous pouvons noter qu'à un instant donné, l'ensemble des points correspondant à

cet instant est pratiquement inscrit dans un demi-cercle. En comparant ces relevés au relevé de la forme latérale et à la forme du bâtiment, il est possible de définir que l'angle de développement latéral est d'environ 20°.

2.4 Mesure de concentration :

Lors des campagnes de mesures sur site nous n'avons pas fait de mesure de concentration pour des raisons expliquées précédemment. Toutefois avec les informations dont nous disposons, concernant la position du nuage au cours du temps et l'estimation de l'intervalle granulométrique, nous pouvons, à l'aide de la turbidité, estimer une concertation probable en certains points.

Nous pouvons, si nous arrivons à déterminer la baisse de luminosité estimer la concentration en particules d'un milieu, à condition de faire de faire une hypothèse sur le type de particules présentes.

Pour estimer la variation de luminosité, nous avons préféré choisir l'instant ou l'objet observé n'est plus visible. Or un objet n'est plus visible à partir du moment où il a perdu 95 % de sa luminosité initiale [REN98].

En connaissant la position de différents objets par rapport au bâtiment en cour de démolition, et en connaissant les positions successives du jet au cours du temps ou sa vitesse, nous pouvons définir la distance entre l'objet et le front du nuage. Ainsi lorsque le nuage recouvre l'objet et finalement le fait disparaître, nous pouvons déterminer l'épaisseur de la couche de nuage entre l'objet et le point d'observation.

En considérant que seul le nuage absorbe de la luminosité, nous pouvons attribuer la disparition de l'objet au nuage et donc définir qu'il y a eu une variation de luminosité de 95 %. De là en procédant à des hypothèses sur le diamètre des particules, nous pouvons remonter à la concentration en particule nécessaire pour faire disparaître cet objet avec cette épaisseur de nuage.

Dans un premier temps, nous avons procédé à une vérification du déplacement du nuage, afin de déterminer si il se déplace de la même manière que les relevés précédents. Puis nous avons déterminé une vitesse moyenne de déplacement, qui permettra de déduire l'ordre de grandeur de la couche de nuage nécessaire à la perte totale de visibilité de l'objet observé.

D (m)	T (s)	E (m)	H (m)	Cd 300 µm (kg/m3)	Cd 100 µm (kg/m3)	Cs 300 µm (kg/m3)	Cs 100 µm (kg/m3)
25	2,5	0,7	20	1	0,35	4,3	1,4
30	2,25	0,4	18	1,9	0,65	6	2

Tableau 14 : Evaluation de la concentration du nuage. Site de Mante la Jolie.

Ce tableau nous présente les intervalles de concentration estimée pour deux points. Le premier est un candélabre situé à 25 m du bâtiment. Le second est un poteau en bois de 0,8 m de hauteur situé à 30 m du bâtiment. Le temps indiqué correspond au moment où l'objet a disparu. E correspond à l'épaisseur du nuage pour que l'objet ait disparu. H correspond à la hauteur du nuage à l'instant T, cette hauteur a servis à faire une estimation de la concentration à la source. Cd correspond à la concentration à la distance D, Cs correspond à la concentration estimée à la source. L'estimation des concentrations a été faite pour des particules de 300 µm de diamètre et pour de particules de 100 µm de diamètre. Le calcul de la concentration à la source a été effectué en faisant :

$$C_s = C_d \cdot \frac{h_{inj}^2}{H^2} \qquad \text{Eq. 69}$$

Le détail de cette procédure sera expliqué dans le chapitre suivant lors du calcul de la vitesse d'injection en connaissant la vitesse d'avancée du nuage.

Ces estimations de concentration ont deux objectifs : pouvoir qualifier un appareillage adapté de mesure et déterminer si l'ordre de grandeur des concentrations à injecter dans le fluide porteur lors des simulations du phénomène.

2.5 Structures turbulentes au cours du temps

Figure 53 : Evolution des structures turbulentes au cours du temps. Site de Mâcon 2

Cette succession d'images nous montre que les structures turbulentes tendent à disparaître à partir de 1,5 fois le temps de chute. En effet, les structures turbulentes sont des structures dissipatives de l'énergie du flux (ref dynamique des flux turbulents Kolmogorov), leur disparition entraine que le montant d'énergie injecté dans le jet est inférieur à l'énergie dissipée par les structures du jet. On peut donc en conclure que le mouvement du fluide porteur tend à se ralentir. L'ordre de grandeur des structures rotatives est pour les plus petits visibles de 0,1 m et pour les plus grosses de 10 m.

2.6 Aspiration

Les relevés de position du nuage de particules au cours du temps montrent que son déplacement dépasse la durée d'effondrement des bâtiments. L'analyse des vidéos montre que les structures turbulentes sont entretenues bien plus longtemps que la durée de chute des bâtiments. Ce qui montre qu'une quantité de l'énergie

est apportée au système de sorte à compenser la dissipation d'énergie de ces structures.

L'analyse des vidéos de démolition montre que les fumées produites par les explosifs sont aspirées par la partie supérieure du bâtiment. Ce phénomène est normal, car le bâtiment occupe un volume initial et, au cours de son effondrement, de l'air est aspiré par la disparition du volume occupé par le bâtiment. Pour mesurer l'intensité de cette aspiration et définir des profils de vitesse, nous avons relevé les composantes de vitesse issues de la corrélation sur différentes lignes au dessus du bâtiment. Quand ces lignes se trouvent dans la fumée en mouvement, nous obtenons les composantes de vitesse de cette fumée le long de cette ligne. Nous faisons l'hypothèse que cette fumée se comporte comme un traceur passif et que son mouvement est représentatif du mouvement du fluide induit par le mouvement du bâtiment.

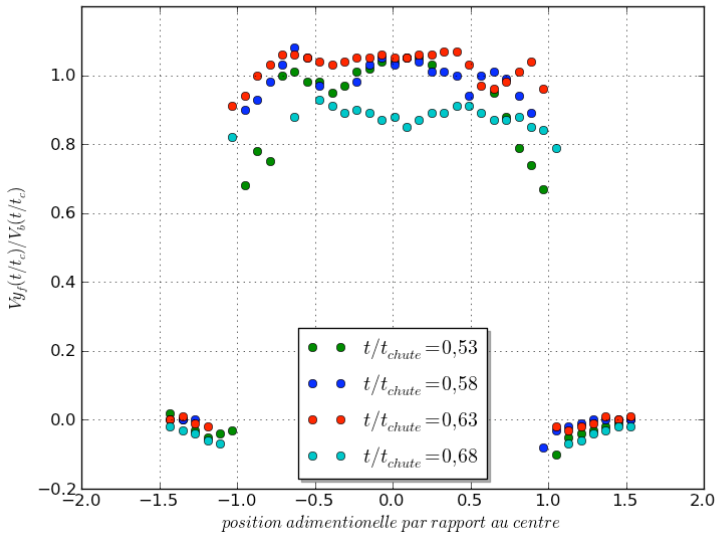


Figure 54 : Profil d'aspiration à 0,5 D. Site de Mâcon 2.

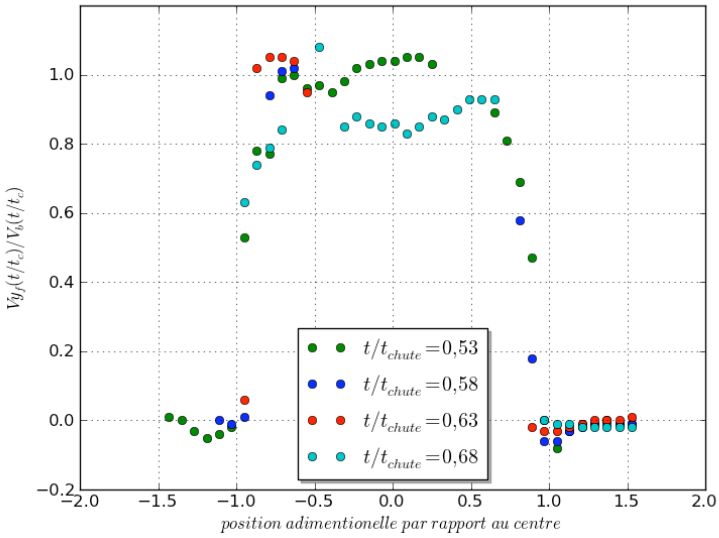


Figure 55 : Profil d'aspiration à 0,6 D. Site de Mâcon 2.

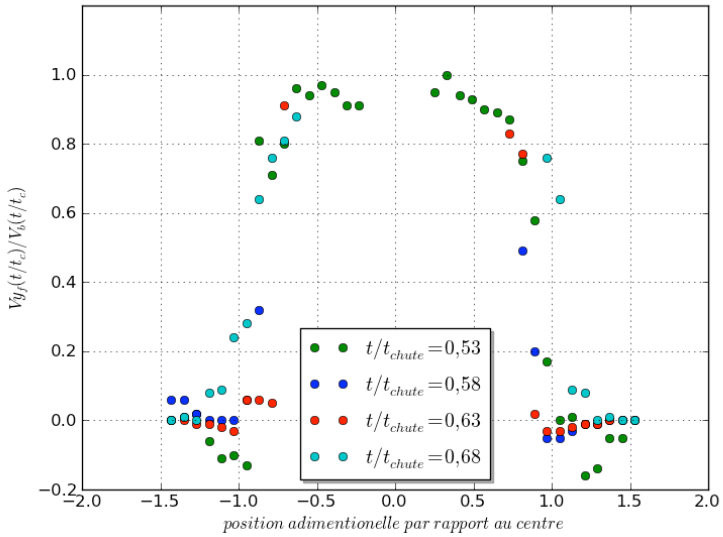


Figure 56 : Profil d'aspiration à 0,7 D. Site de Mâcon 2.

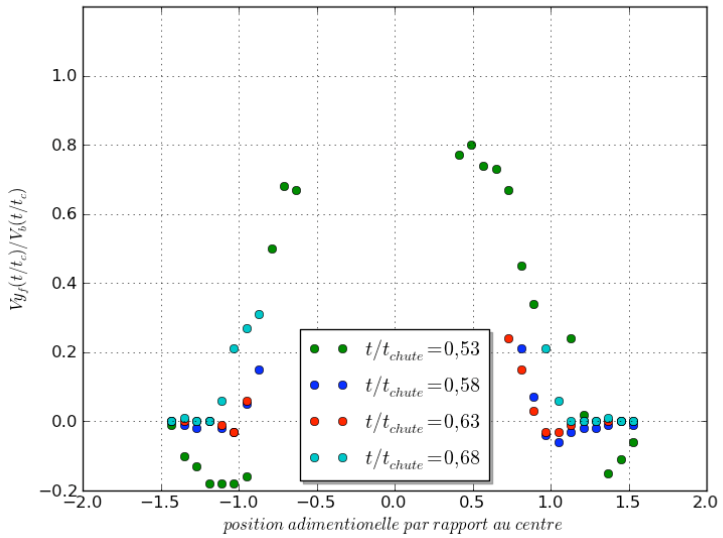


Figure 57 : Profil d'aspiration à 0,8 D. Site de Mâcon 2.

2.6.1 Construction des courbes :

Pour définir les courbes représentant les profils d'aspiration nous avons filtré les résultats issus de la corrélation en définissant différentes lignes de relevé. La disposition de ces lignes est présentée sur la Figure 58.

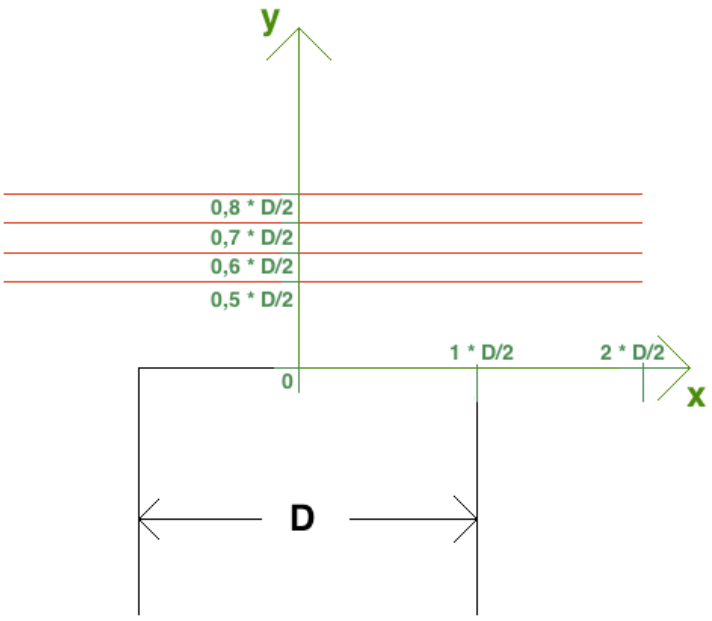


Figure 58 : repère de disposition des sondes d'aspirations.

D représente la dimension horizontale du bâtiment (largeur). Comme les relevés ont montré une tendance à la symétrie de l'écoulement, toutes les longueurs ont été rapportées à D/2. Le repère des relevés a été orienté comme présenté sur la figure ci-dessus. L'origine a été placée au milieu de la largeur du bâtiment. La norme du déplacement du fluide a été rapportée à la norme du déplacement du bâtiment. Les différents temps de relevé ont été rapportés à la durée d'effondrement du bâtiment.

2.6.2 Description :

Le nuage vient du bord du bâtiment vers le centre. Il n'occupe pas la totalité de la section du bâtiment, ce qui explique les discontinuités de relevé des vitesses. Au cours du temps cette source aura tendance à garder la même position sauf pour la partie du nuage qui a été mis en mouvement par l'aspiration du bâtiment.

L'ordre de grandeur des vitesses relevé correspond à la vitesse de chute du bâtiment. Le dépassement de la vitesse du bâtiment est dû aux incertitudes liées au déplacement du bâtiment d'une part et d'autre part au bruit lié à la corrélation. Les relevés à 0,5 D et 0,6 D pour t/chute = 0,68 sont très influencés par l'effondrement d'un bâtiment à l'arrière du champ de vision. C'est pourquoi les vitesses relevées au centre sont inférieures à la vitesse de chute du bâtiment. Les profils de vitesses ont une allure générale de chapeau mexicain. Ils sont positifs au dessus du bâtiment et négatifs en dehors et tendent vers 0 à l'infini.

Au début du mouvement les sondes sont placées dans le nuage qui sert de traceur. C'est pourquoi les relevés font état d'une forte vitesse ascendante en dehors du bâtiment. Plus tard les sondes ne sont plus dans ce nuage ce qui ne permet plus de visualiser la vitesse ascendante. C'est pourquoi elle semble être moins intense.

Si l'on reporte la position des sondes sur un graphique et que l'on marque la position des points ou le flux atteint la vitesse du bâtiment, on peut remarquer que les profils de vitesses semblent suivre un cône qui à pour base la largeur du bâtiment et pour hauteur la demie largeur du bâtiment.

Figure 59 : Visualisation des fumées d'explosif aspiré et du bâtiment en cour d'effondrement à l'arrière-plan. Site de mâcon 2.

2.7 Fluctuation de vitesse

Ces graphiques représentent les relevés de vitesses du nuage au cours du temps en différents points. Pour le site de Mâcon 1. Ils ont été obtenus par l'analyse corrélatoire de vidéo haute vitesse. La fréquence d'échantillonnage est de 125 Hz. L'ordre de grandeur de l'échelle de la vidéo était 10 cm/px. Ce point entraine qu'il n'est pas possible de détecter des fluctuations de tourbillons inférieurs à

10 cm. Toutefois, l'analyse visuelle de la forme du nuage nous a montré que les tourbillons les plus petits visibles sont de l'ordre de 0,1 m.

Les sondes ont été disposées comme suit :

Sonde	Distance au bâtiment	Hauteur par rapport au sol
1	27 m	10 m
2	28 m	10 m
3	29 m	10 m
4	30 m	10 m

Tableau 15 : Position des sondes de mesures. Site de Mâcon 1.

Le graphique suivant présente l'évolution de la composante Vx des sondes. La disposition des courbes suit l'ordre croissant du numéro de sonde.

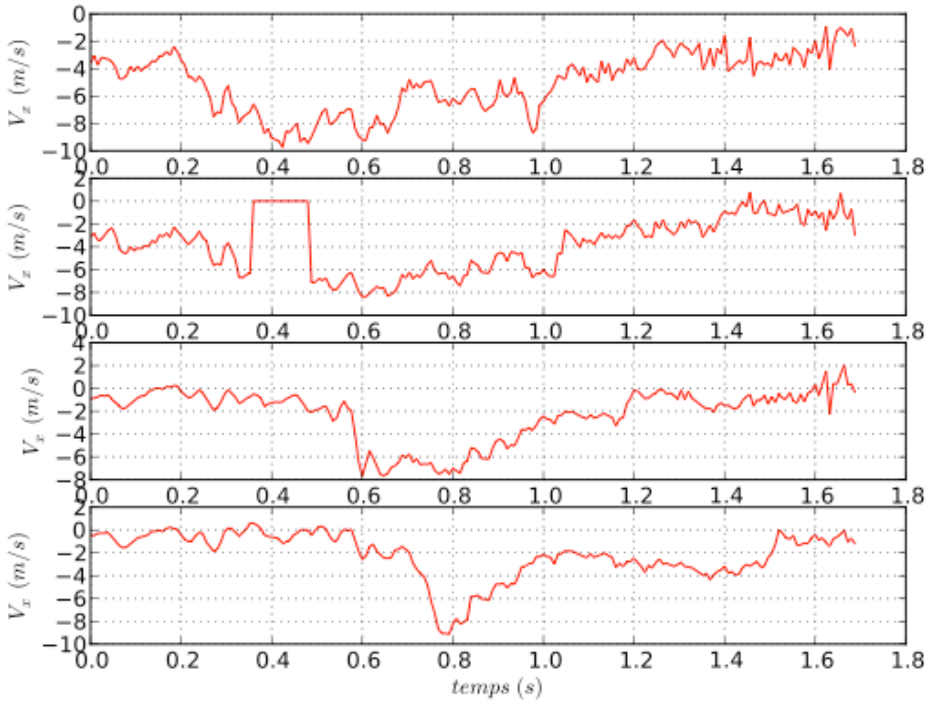


Figure 60 : Relevé des fluctuations de vitesses. Site de Mâcon 1.

Sur ces relevés nous pouvons très clairement voir l'arrivée du nuage sur les différentes sondes, par le fait de la croissance très rapide de la vitesse de 0 à 10 m/s suivie d'une décroissance quasi linéaire de la vitesse au cours du temps.

La vitesse moyenne suivant x décroît rapidement vers 0, ceci peut s'expliquer par le fait que nous mesurons une vitesse en un point qui suit la surface du jet au cours du temps. Au fil du temps nous enregistrons donc la vitesse de différentes parties du front du jet puis de son corps. Or la vitesse au bord d'un jet est proche de 0 du fait de la viscosité.

L'analyse des fluctuations de vitesses nous donne des valeurs de k comprises entre 1,92 et 1,95. Et des intensités de turbulences comprises entre 0,4 et 0,6. L'analyse par corrélation temporelle nous donne des durées de vie de tourbillons de l'ordre de 0,2 seconde. Et l'analyse par corrélation spatiale nous donne des tailles de tourbillons de l'ordre de 0,5 m

3 3D

L'analyse 2D des vidéos de démolition est une méthode simple et efficace qui peut se conduire dans un premier temps manuellement. Elle est bien adaptée pour l'analyse du mouvement d'objets géométrique simple et connue (bâtiment), tant que ces objets ne se déforment pas. Elle est par contre moins adaptée pour des objets avec des formes complexes, dont l'orientation du mouvement n'est pas connue avec précision jet de particules issues du bâtiment). Dans ce cas elle suppose de prendre des hypothèses sur la forme et sur le mouvement de l'objet, et de faire les corrections appropriées sur les échelles à utiliser.

Pour pallier à ces défauts, nous avons décidé de forger une suite d'outils permettant de faire une analyse tridimensionnelle du mouvement du nuage. Cette suite d'outils est constituée du corrélateur développé pour l'analyse 2D, d'algorithme de calibration de caméra, d'algorithme de stéréo calibration de deux caméras, d'outils d'ajustement des paramètres, et d'outils de reconstruction 3D et de visualisation.

Après avoir déterminé le décalage temporel entre les deux prises de vue, il est possible de former des couples d'images prises au même instant, mais de deux points de vue différents. Ces couples seront analysés par corrélation afin de déterminer le mouvement des points entre les deux images. Il sera alors nécessaire de déterminer la transformation permettant d'exprimer les points du repère de la première caméra vers le repère de la seconde caméra. Cette transformation sera vérifiée et éventuellement corrigée. Une fois ces opérations effectuées il devient possible de suivre l'évolution du jet au cours du temps.

La figure suivante montre le résultat de la reconstruction 3D sur 300 m de profondeur. L'axe X représente la largeur l'axe Y la hauteur et l'axe Z la profondeur. Cet ensemble de vue nous permet de vérifier la position des objets reconstruits. Il est à noter que plus on est près de la zone de prise de vue plus le positionnement en profondeur est précis. Malgré la bonne qualité de la reconstruction, il subsiste pas mal de bruit. Ce bruit est dû à 3 facteurs :

- Le passage d'un espace discret (pixel de la photo) vers un espace continu (espace 3D) ;
- La qualité de la corrélation ;
- La précision de l'orientation des caméras.

La figure suivante est une représentation de l'interface graphique développée pour affiner les paramètres de rotation des caméras. On peut à l'aide des curseurs du bas modifier les angles de rotation et en observer le résultat (quasiment en temps réel).

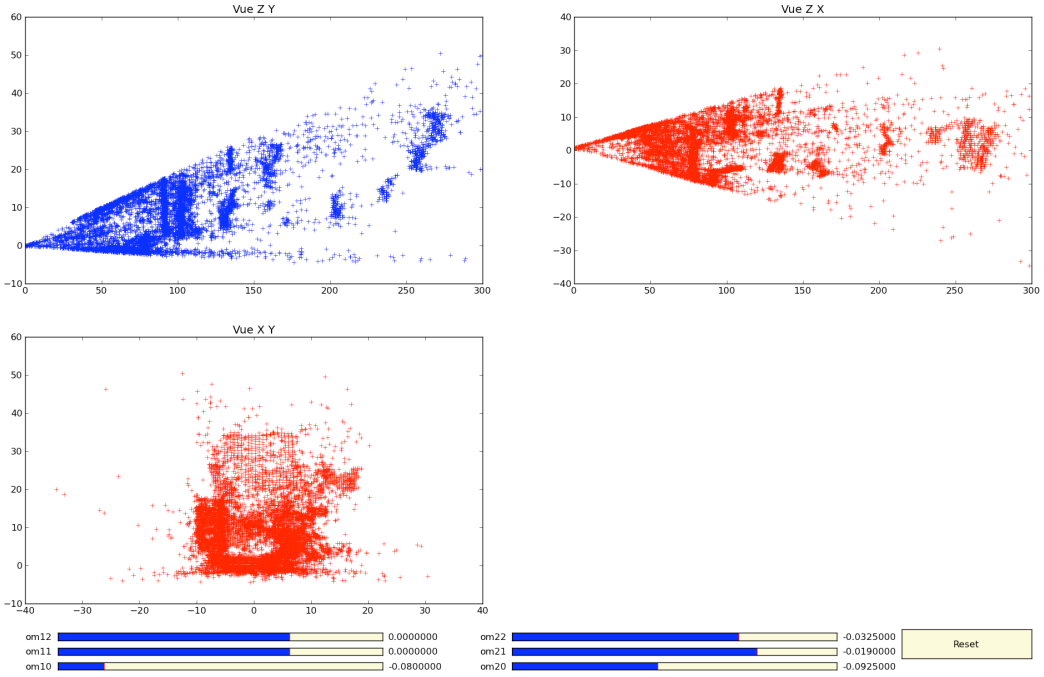
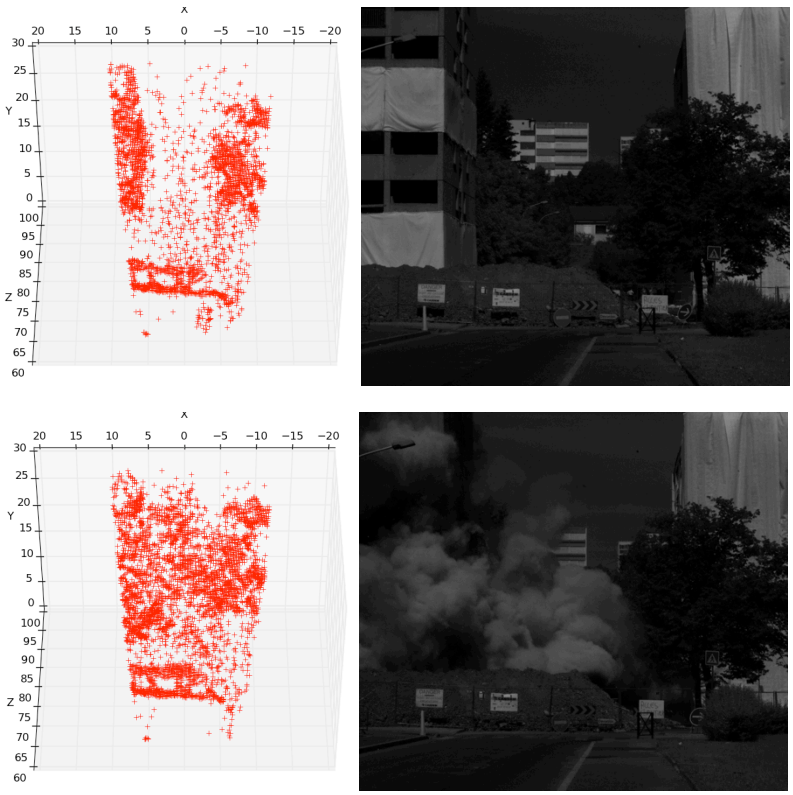


Figure 61 : Fenêtre d'ajustement des paramètres de la reconstruction 3D. Site de Mâcon 2.

La série d'images suivante montre à gauche la reconstruction 3D de la scène observée et présentée à droite. Sur la première reconstruction, on peut voir, à gauche le bâtiment, à droite l'arbre et devant le merlon. Les rectangles blancs correspondent à la projection sur le merlon des panneaux installés devant le merlon. Ils ne sont pas visibles sur ces vues car leur orientation est presque orthogonale au plan projectif de cette vue.



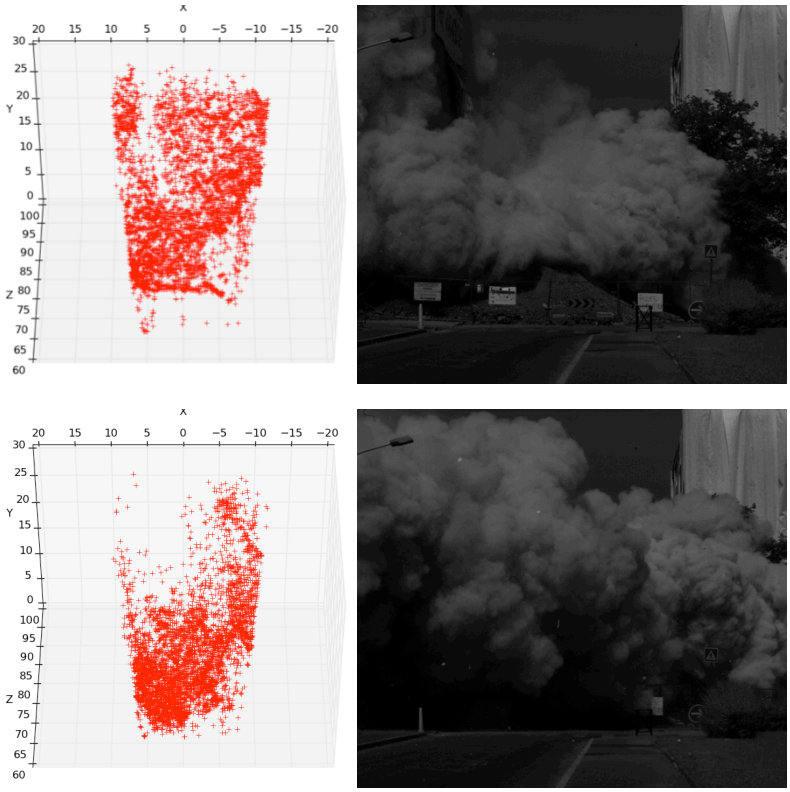


Figure 62 : Reconstruction 3D du nuage de particules à 4 moments successifs. Site de Mâcon 2 (0 s ; 0,5 s ; 1 s ; 2,5 s).

Au cours du temps nous pouvons voir qu'un ensemble de points issus du bâtiment recouvrent l'ensemble de la scène. C'est le mouvement du nuage de particules. Une analyse détaillée de ces vues, semble nous montrer que les différentes structures turbulentes de surface sont bien représentées si elles sont suffisamment grandes, ici si elles dépassent 10 pixels. Ce qui est normal puisque la corrélation a été faite avec un décalage de 10 pixels.

4 Discussion :

4.1 Etude globale du processus de démolition :

Les différents résultats sur la dynamique de l'effondrement d'un bâtiment nous permettent de conduire une étude globale et simplifiée du processus de démolition. Cette analyse a pour objectif de montrer les principaux points à aborder pour mener une simulation de l'effondrement, mais aussi pour créer un lien avec la propagation et la création des particules.

4.1.1 Situation initiale :

L'ensemble des bâtiments étudiés a été miné de la manière suivante :

- les deux étages du bas sont totalement minés ;
- les étages supérieurs sont partiellement minés ;
- Chaque voile, poteau est miné en deux points séparés de d = 1,2 m pour chaque étage.

Ce mode de minage représente le minage standard des édifices à démolis en France. Le séquençage des charges est de 25 ms. Ce séquençage tend à passer vers 0.5 s. Le schéma présenté sur la suivante nous représente la répartition du minage pour un bâtiment de 16 étages.

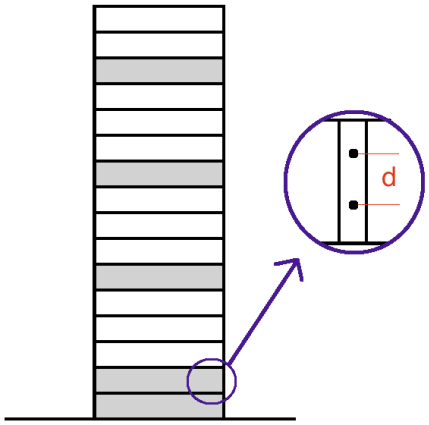


Figure 63 : Répartition type du minage pour un immeuble de 16 étages.

4.1.2 Mouvement des bâtiments :

L'étude de l'effondrement des bâtiments nous a montré que le mouvement du haut du bâtiment était régi par une loi du type :

$$x = H - \frac{1}{2} g t^2 + Exp\left(A \ln(t) + B\right) \qquad \text{Eq. 70}$$

L'expression du terme en exponentielle implique que dans les premiers instants il soit négligeable par rapport au terme en gt^2. De ce fait, la première phase du mouvement est régie par la seule action de la pesanteur. Ce point est en cohérence avec le fait que le minage des deux premiers étages soit total. Au moment de l'amorçage des charges, le bâtiment est désolidarisé de sa base et entame un mouvement régi par la seule action de la pesanteur.

Dans un premier temps, le bâtiment est désolidarisé du sol. Il va donc acquérir, sous l'action de la pesanteur, une vitesse avec laquelle il va entrer en contact avec le sol. Pour évaluer cette vitesse, nous pouvons considérer deux cas :

- Les deux premiers étages sont totalement détruits et il n'en reste rien si ce n'est un tas ayant une hauteur de 0,20 fois la hauteur des étages détruits. Alors pour des étages de 2,8 m de haut, la vitesse initiale sera de 9,4 m/s au bout de 0,96 s ;

- Les deux premiers étages ne sont pas entièrement détruits. Le mouvement en chute libre du bâtiment peut avoir lieu sur une distance égale à la distance entre les explosifs soit 2*d = 2,4 m. Alors, la vitesse initiale sera de 6,9 m/s au bout de 0,7 s.

L'analyse adimensionnelle des courbes nous montre qu'il n'y a pas de différences significatives entre la position des bâtiments et d'un objet en chute libre pendant 0,2 fois le temps de chute. Soit, pour une durée d'effondrement de 3,5 secondes, pendant un temps de 0,7 s. C'est donc la seconde hypothèse qui semble la meilleure. Ceci nous permet de définir le montant initial de l'énergie cinétique juste avant le contact avec le sol. Pour un bâtiment de 13650 tonnes, ce montant sera de 0,325 $*10^9$ J pour une vitesse de contact de 6,9 m/s.

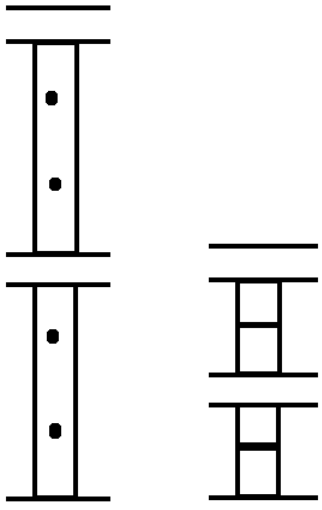


Figure 64 : principe de la seconde hypothèse.

Par la suite le bâtiment est en contact avec le sol et commence sa dislocation. Au cours de sa destruction il se forme un tas de gravats qui atteindra une hauteur de finale de 20 % la hauteur du bâtiment. Au cours du processus il se produit donc

un fort gradient de vitesse suivant la verticale entre la partie basse du bâtiment à une vitesse proche de 0 et sa partie supérieure en mouvement. La vitesse du bâtiment aura tendance à augmenter puis à décroitre en fonction de la diminution de masse du bâtiment.

4.1.3 Localisation de la déformation :

Les mesures de déformations du bâtiment ont montré que le bâtiment ne se déforme pas dans sa partie visible ce qui entraine que ce gradient de vitesse est concentré dans la partie cachée par le jet de particules. Cette partie non visible regroupe le tas en cours de formation et la partie inférieure du bâtiment. Le graphique de la Figure 49 nous renseigne pour le bâtiment K1 de Mante la Jolie, sur la hauteur de la partie non visible.

Même si nous n'avons pas de données sur la répartition de la déformation dans cette partie non visible, il est possible de préciser la zone ou la déformation est la plus forte. En effet le tas de gravats est issu de la dislocation du bâtiment. Il est plus compact que le bâtiment non disloqué, car l'ensemble du bâtiment sera compris dans le tas. Etant plus compact il a moins de possibilités de déformation. C'est pourquoi il est raisonnable de penser que la déformation se situera principalement dans la partie inférieure, non visible, du bâtiment. Si l'on fait l'hypothèse que le tas de gravats croit en fonction de la chute du bâtiment, alors il est possible d'évaluer cette hauteur. C'est ce que montre le graphique de la Figure 50.

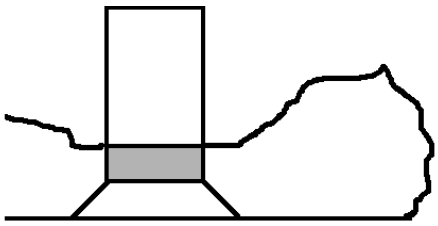


Figure 65 : Localisation de la déformation au cours de la démolition — zone grise.

4.1.4 Vibration

Au cours de l'effondrement, le sol est parcouru par une onde sismique. Cette onde est de nature à pouvoir détériorer les bâtiments alentour. C'est pourquoi elle est mesurée en certains points « critiques ». Ces mesures ont pour objectifs de rendre compte d'un état vibratoire aux assurances, elles ne permettent pas de conduire une étude du phénomène. Toutefois, cette vibration du sol montre clairement que le sol a une interaction avec le processus de démolition. Au vu de la grande hétérogénéité des caractéristiques mécaniques des sols due aux variations de type d'affleurement, il est inopportun de définir une action identique des sols pour tous les sites de démolitions.

A ce jour l'interaction du sol n'est pas prise en compte pour le dimensionnement du minage. Le fait qu'il soit opérant sur tout type de sol nous indique que le minage est fortement sur dimensionné. Nous pouvons regretter qu'il n'y ait pas de cartographie des caractéristiques mécaniques des sols [cite BRGM]. Ceci implique que pour une démolition il serait nécessaire de conduire des essais pour définir les caractéristiques des sols [ref].

4.1.5 Fonction du minage

Nous avons montré que les bâtiments ne se déforment pas dans leur partie supérieure, nous pouvons donc décomposer le processus de minage en deux parties. La première concerne les deux premiers étages, ils fixent la condition initiale de vitesse lors du contact du bâtiment avec le sol. Cette partie permet donc de définir un montant d'énergie cinétique minimum pour le bâtiment. La seconde concerne l'ensemble des autres étages miné, comme le bâtiment ne se déforme que dans sa partie basse, et non dans les étages minés, nous pouvons voir ce minage comme servant à diminuer localement la consommation d'énergie par déformation et fracturation. Nous avons donc des étages qui servent à initier le mouvement, les deux premiers, et les autres qui servent à l'entretenir.

Il est donc possible de décomposer le mouvement en 2 phases. La première de l'instant initial au moment où le bâtiment rentre en contact avec le sol. Le bâtiment est totalement désolidarisé du sol, son mouvement est alors régi par la chute libre. Car au vu de sa masse et de sa forme les frottements de l'air sont négligeables. La seconde de l'instant du contact à la fin de la démolition. Dans cette phase les étages se déforment et se fracturent. Le mouvement n'est plus régi par la chute libre.

4.1.6 Systèmes :

De ces observations nous pouvons définir un ensemble de systèmes en interaction :

- S1, définis par l'ensemble du bâtiment non disloqué, globalement dans cet ensemble le mouvement est homogène, sauf dans une zone où il y a une forte déformation. Ce système perd de la masse au cours de la dislocation du bâtiment.

- S2, définit par le tas qui se forme au pied du bâtiment. Ce système augmente de masse au cours du temps. Il récupère la plus grande partie de la masse perdue par S1.

- S3, définit par le sol mis en mouvement.

- S4, définit par le nuage de particule. Il est constitué par l'air mis en mouvement par la démolition et par la masse manquante à S2. Par

rapport à l'ordre de grandeur des masses échangées entre S1 et S2 il est possible de négliger ce système pour l'étude de la démolition.

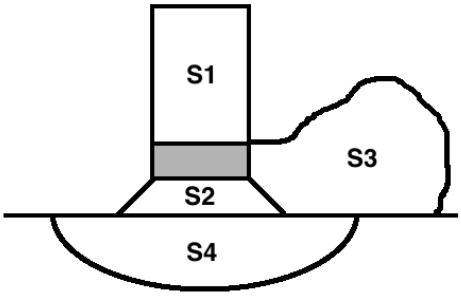


Figure 66 : description des différents systèmes.

4.1.7 Variation d'énergie cinétique de S1

Comme S1 perd de la masse au fil de sont mouvement il est non conservatif. Il convient donc de prendre ce point en compte lors de l'évaluation des différents termes du bilan d'énergie cinétique. Même si le phénomène de démolition est a priori discontinu, nous avons choisi en raison de l'allure continue des courbes de mouvement de le traiter comme continu. Nous avons défini les différents termes du bilan à partir des mesures de positions du bâtiment.

L'expression de la variation d'énergie cinétique pour un système à masse variable est :

$$\frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2}\frac{dm}{dt}v^2 + mv\frac{dv}{dt} \qquad \text{Eq. 71}$$

Dans notre cas la masse de S1 est fonction de la taille du bâtiment, donc de la hauteur du bâtiment moins la hauteur du tas. Cette hauteur est multipliée par un coefficient de masse linéique. Ce coefficient suppose que la masse est répartie uniformément suivant la hauteur du bâtiment. Le calcul de la variation de masse prendra donc en compte la variation de hauteur du bâtiment par rapport à la hauteur du tas.

La hauteur du tas est définie par :

$$h_{tas} = \frac{\left(H_{ini_bat} - h_{bas}\right)H_{tas_final}}{\left(H_{ini_bat} - H_{tas_final}\right)} \qquad \text{Eq. 72}$$

Dans cette équation les termes en majuscules sont des constantes, telles que la hauteur initiale du bâtiment et la hauteur finale du tas. Les termes en minuscules sont des variables, tel que la hauteur courante du bâtiment et la hauteur du tas par rapport au sol.

Donc la variation de masse prend l'expression :

$$\frac{dm}{dt} = \lambda\left(\frac{dh_{bat}}{dt} - \frac{dh_{tas}}{dt}\right) \qquad \text{Eq. 73}$$

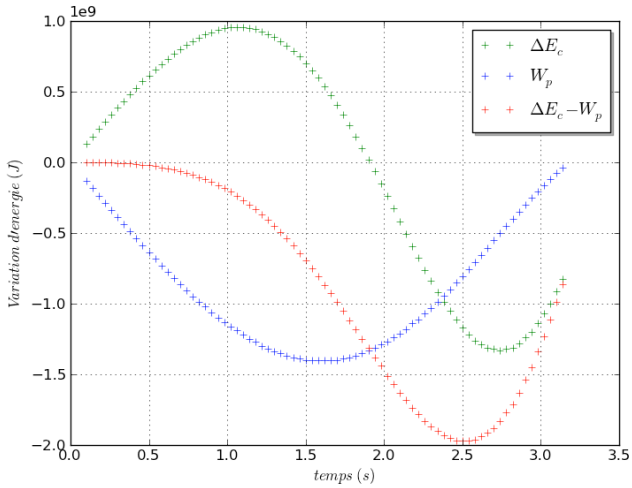


Figure 67 : Variation des différents termes connus du bilan d'énergie cinétique d'un bâtiment au cours de son effondrement. Mante la Jolie K1

Ce graphique présente les termes connus du bilan d'énergie cinétique de S1, pour le bâtiment K1 de Mante la Jolie. A savoir la variation de l'énergie cinétique et la puissance des actions extérieure. Les actions extérieures se restreignent au seul terme de gravité. Comme nous ne connaissons pas la puissance des efforts intérieure et la puissance des actions de contact, nous avons représenté la différence entre la variation d'énergie cinétique et la puissance de la force de pesanteur.

En toute rigueur nous aurions dû considérer les actions de l'air sur le mouvement du bâtiment. Ces actions se seraient réparties en action de contact par frottement pariétal et en action à distance du fait de la disparition du volume occupé par le bâtiment. Toutefois sur l'étude énergétique de la démolition ces actions sont négligeables, car les vitesses atteintes par les bâtiments sont beaucoup plus petites que la vitesse limite de chute d'un objet dans l'atmosphère.

Nous pouvons voir que pendant les premiers instants le mouvement est régi par la seule action de la pesanteur, il correspond donc à une chute libre. Par la suite la le contacte du bâtiment avec le tas et la déformation du bâtiment viennent à empêcher que le mouvement ne soit régit que la seule action de la pesanteur. L'ordre de grandeur des puissances et des variations d'énergie maximum est de 2.10^9 joules. N'ayant pas d'information sur les actions de contact et sur les processus de déformation, il n'est pas possible d'estimer la part de chacun de ces termes. Toutefois, les valeurs prises par la somme de ces deux termes sont telles que le niveau de chacun de ces termes est à priori très grand.

Les actions de contacts dépendent d'une part de la sollicitation (vitesse) et d'autre part de la nature des objets en contact. Elles dépendront donc des

caractéristiques mécaniques du bâtiment, du tas et du sol. Suivant les valeurs de ces dernières les actions de contact auront tendance à favoriser la dislocation ou à la défavoriser. Pour s'en convaincre, il suffit d'observer le résultat d'un œuf tombé sur un sol dur et d'un œuf tombé sur une épaisse couche de coton. Étant donné que le phénomène de déstructuration du bâtiment, à l'échelle de ce dernier, est dû à un phénomène de compression, la puissance des actions de contact sera toujours négative. Car T et V seront toujours de sens opposés. Les actions de contact entre S1 et S2 seront la source de la déformation de S2. Les variations des actions de contact entre S1 et S2 entraineront une variation des actions de contact entre S2 et S3.

La puissance des actions de contacte entre S1 et S2 peut être vue comme un terme de transmission d'énergie le sol via le tas. Énergie, qui sera la source des vibrations et de la déformation du sol. Cette énergie viendra à se soustraire du montant d'énergie disponible pour la déformation du bâtiment. En procédant à une analyse vibratoire et en connaissant la nature des sols, il devrait être possible de quantifier le montant d'énergie transmis au tas et au sol. Et donc de définir le reste disponible pour la déformation et la fracturation du bâtiment.

La puissance des actions intérieures regroupe la déformation de l'immeuble, sa fracturation, ainsi que la mise en mouvement de l'air contenu dans le bâtiment. Comme précédemment nous pouvons négliger l'énergie prélevée par l'expulsion de l'air du bâtiment.

La connaissance du montant de ce terme et la connaissance du mode de déformation et de rupture du bâtiment pourraient nous permettre de définir un modèle de génération de particules. Car au final la fracturation peut être vue à la manière de la turbulence, comme un processus de dissipation d'énergie. Toutefois, il faudrait vérifier la valeur du dégagement thermique et la valeur du champ électrique formé par la déformation des armatures métalliques du béton armé.

En partant du fait que la fracturation consomme 100 J/m2 de fissure crée, et en négligeant la puissance des actions de contact nous pouvons définir un nombre maximum de particules cubiques. L'énergie totale disponible pour la création des particules est de $2{,}73.10^{9}$ Joules.

Taille en µm	Masse totale en T
200	5668
100	568
10	56,8
1	5,68

Tableau 16 : Masse maximale de particules pouvant être produite en fonction de leur diamètre.

Nous pouvons voire que plus les particules créent sont petite moins il est possible d'en créer avec le montant d'énergie disponible. Si une partie de ce montant est consommé par : la déformation du bâtiment, du tas et du sol ; des dégagements thermiques ; et des phénomènes électromagnétiques, alors le nombre de particules totales crée sera d'autant plus faible. Comme les caractéristiques mécaniques des sols varient fortement suivant les zones géographiques il est raisonnable de penser que ce facteur aura une forte influence sur la dynamique de l'effondrement et sur la création des particules.

La taille des blocs du tas formé par le bâtiment est de l'ordre du mètre. Ce point nous a fait penser que le mode de déformation et de rupture des éléments du bâtiment ressemble au flambage. En effet si la rupture d'un poteau de 2,8 m en cour de flambage s'effectue aux endroits de plus forte déformation alors les blocs obtenus auront une taille de l'ordre du mètre. L'analyse de vidéo semble accréditer ce fait, car nous avons pu observer que les poteaux et les voiles se disloquent en 3 points sur leur hauteur tout comme le suggère [BAZ07] dans son modèle.

En analysant la déformation d'un flambage d'un poteau encastré à ses deux extrémités, nous avons pu voir que les zones de plus fortes déformations sont réparties, 0,2 m autour des extrémités et du centre du poteau (Figure 68 : répartition des zones de déformation lors du processus de flambage.). Nous pouvons alors penser que l'énergie nécessaire à la fracturation se répartira suivant cette déformation. Cette idée est le fondement de notre modèle simplifié de création de particules.

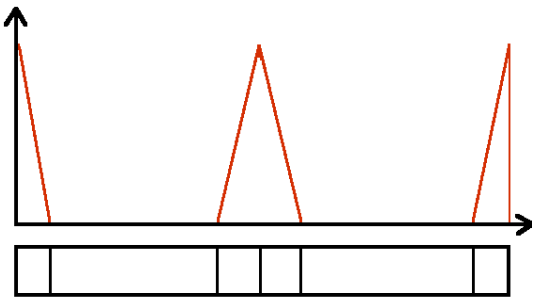


Figure 68 : répartition des zones de déformation lors du processus de flambage.

En connaissant l'énergie de fracturation utilisée pendant une durée permettant la destruction d'un étage, en connaissant les longueurs des murs ainsi que leur largeur nous pouvons, en considérant que les particules créées sont cubiques, définir la taille des particules créées.

4.1.8 Modèle de création de particules

Soit l'ensemble des murs de l'étage. Ils sont définis par leur hauteur H leur longueur L (qui représente une longueur équivalente des murs et des planchés) l'épaisseur de ces murs est comprise entre 0,1 m et 0,2 m (c'est l'épaisseur standard des murs des immeubles étudiés). L'énergie disponible pour la

fracturation est répartie linéairement de la manière présentée sur le schéma Figure 68. Nous postulons qu'à une abscisse donnée un seul type de particule est créée. Alors, à cette abscisse l'énergie de fracturation disponible sur une longueur de particule est définie par :

$$E = \int_{x}^{x+e} E(x)dx \qquad \text{Eq. 74}$$

Cette énergie se repartira sur un volume défini par

$$V = e \cdot E_{mur} \cdot L \qquad \text{Eq. 75}$$

La surface d'une particule cubique est définie par

$$S = e^2 \cdot 6 \qquad \text{Eq. 76}$$

Le nombre de particules est défini par

$$Nb = \frac{E_{mur} \cdot L}{e^2} \qquad \text{Eq. 77}$$

Comme l'énergie nécessaire pour créer Nb particules de dimension e doit être égale à l'énergie de fracturation disponible E alors la taille e des particules crée est :

$$e = \frac{6 \cdot E_{mur} \cdot L \cdot 100}{E} \qquad \text{Eq. 78}$$

Dans notre cas nous n'avons pas d'information ni sur l'énergie transmise au sol ni sur le temps nécessaire pour détruire un étage. Nous avons donc choisi de mener le calcul de manière globale en considérant qu'il n'y avait pas d'énergie transmise au sol et que la seule énergie de déformation était l'énergie de fracturation.

Pour le bâtiment présenté, la longueur totale des murs est de 1900 m. Comme précédemment l'énergie disponible pour la fracturation est de 2,73 * 10^9 Joules. En procédant comme nous l'avons exposé ci-dessus nous obtenons le résultat suivant :

- La quantité totale de particules produites est de 280 Tonnes.
- L'étendue granulométrique des particules produite va de 30 µm à 2 mm.

La répartition granulométrique des particules produite est la suivante :

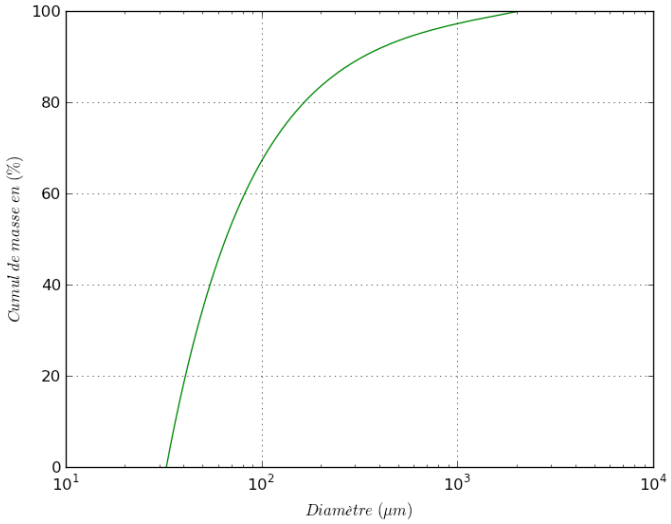


Figure 69 : répartition granulométrique des particules créées.

Bien que ce modèle ne présente pas la totalité de l'étendue granulométrique retrouvée, il présente l'avantage de proposer une répartition granulométrique et une quantité de particules, en vue d'une simulation numérique. Cet exemple a été fortement simplifié dans le sens ou tous les murs n'ont pas la même épaisseur. De plus, il ne tient pas compte de l'éventuelle production de particules du tas, ni même de la production de particules générée par la dislocation des dalles. Nous avons volontairement retiré les dalles de ce modèle de fracturation, car il ne nous paraît pas adapté dans le sens ou les dalles ne seront pas détruites par un processus de flambage, mais plutôt par contact avec un sol irrégulier et sa compression par d'autres étages.

4.1.9 Voie vers la simulation du phénomène

Il apparaît, des différents résultats présentés, que l'étude du phénomène doit prendre en compte plusieurs paramètres tels que :

- la nature du sol, afin de déterminer l'action de celui-ci sur le processus d'effondrement ;
- la formation du tas et sa restructuration au cours de l'effondrement ;
- la nature de la construction ;
- et le plan d'affaiblissement et de minage.

A ce jour, la nature du sol et la formation du tas ne sont pas prises en compte. Or ces deux paramètres ont une grande importance dans le processus de démolition.

4.2 Dynamique du nuage

Des mesures effectuées nous pouvons dresser un portrait détaillé du phénomène de propagation. La propagation du nuage de particule induit par la démolition de bâtiment peut se décomposer en deux parties. La première ou le déplacement du nuage est principalement dû à l'effondrement du bâtiment. La seconde où le mouvement est régit par l'écoulement atmosphérique à la manière du déplacement d'une pollution dans un aquifère. Dans notre travail nous nous sommes principalement attacher à décrit la première phase. Car c'est elle qui conditionne la totalité du mouvement. Et c'est à ce moment que d'éventuelles mesures visant à réduire l'intensité du nuage peuvent être mises en place.

Dans cette phase l'écoulement prend la forme d'un jet plan turbulent multiphasique. Cet écoulement se décompose en deux parties :

- la première : ou l'écoulement est provoqué par l'explosion des charges ;
- la seconde : où l'écoulement est provoqué par l'effondrement du bâtiment.

4.2.1 Mouvement du jet :

Lors de la première partie, le mouvement du nuage est dû à l'explosion des charges, qui libèrent une quantité de gaz du fait de la réaction chimique. Dans cette étape le mouvement est très rapide, mais ne dure que quelques instants. Son amplitude est d'environ 15 m en moins d'une seconde.

C'est la seconde partie qui représente à proprement parler le mouvement prédominant du jet. Dans cette partie le jet prend naissance au niveau du bâtiment, ce qui le rend difficile à mesurer dans les premiers instants, car il parcourt l'espace occupé par la première partie de déplacement du jet. Dans cette seconde partie, la vitesse d'avancée du jet, ou la vitesse du front du jet peut se décomposer en trois parties. La première ou le jet a une vitesse d'avancée variable au cours du temps : sa vitesse semble passer de 17 m/s à 13 m/s. La seconde ou le jet aura une vitesse constante de 7 m/s. La dernière ou cette vitesse tend à s'annuler pour que le front atteigne une distance maximale de l'ordre de la hauteur du bâtiment démoli. La vitesse moyenne relevée est de l'ordre de 4 m/s. L'analyse visuelle du comportement du jet nous a permis de relier la transition entre la deuxième partie et la dernière à un phénomène de décollement de couche limite, qui se manifeste par le fait que le jet prenne une forte direction ascendante. Ce décollement se produit après la fin de l'effondrement du bâtiment à 1,4 fois le temps de chute et à une distance de 0,8 fois la hauteur du bâtiment.

Le décollement de couche limite se produit lorsqu'il y a inversion du gradient de pression. Cette inversion se produit lorsque :

$$\frac{\partial p}{\partial x} > 0 \qquad \text{Eq. 79}$$

Ce décollement nous renseigne sur deux points :

- il persiste une vitesse d'entrée du jet après l'effondrement du bâtiment ;
- au moment du décollement, la vitesse d'entrée décroit fortement, cette décroissance de la vitesse se produit à 1,4 fois le temps de chute.

4.2.2 Forme du jet :

Le jet prend naissance contre une paroi de l'immeuble en cour d'effondrement. La hauteur du jet le long de cette paroi est appelée hauteur d'entrée. Globalement le jet se propage en partant d'une paroi et orthogonalement a celle-ci. Pour un bâtiment de 4 faces, il y a donc 4 jets qui semblent avoir la même dynamique. Il n'y a que pour les bâtiments dont l'emprise au sol est très fortement rectangulaire ou le jet se propagera préférentiellement en partant des plus grandes façades.

Les hauteurs d'entrée relevée sont comprises entre 6 et 11 m en partant du sol comme le montre la Figure 49. Rien ne nous permet de définir ci cette hauteur est effectivement utilisée par le souffle. Les graphiques nous montrant l'évolution de la hauteur au cours du temps ainsi que la largeur nous permettent de définir les angles d'ouverture de ce jet (Figure 47; Figure 48; Figure 51; Figure 52). Ils sont compris entre 20° et 30° pour l'angle d'ouverture verticale et 20° pour l'angle d'ouverture latérale. Au départ du mouvement le jet n'a pratiquement pas d'angle d'ouverture, ce n'est qu'au cours du mouvement qu'il s'ouvre progressivement. Malheureusement, nos données ne nous permettent pas de définir l'évolution de cette ouverture sauf pour la hauteur.

L'entrée du jet à une forme rectangulaire du fait de la forme du bâtiment. Le front du jet quant à lui prend une forme d'arc de cercle de sorte que la forme du front puisse être approximée par un élément de sphère. Au cours de sont mouvement une partie du jet semble être attiré vers le bâtiment Figure 70. Ce phénomène est certainement dû au mouvement du bâtiment qui a tendance à aspirer l'air au dessus de lui. Comme le montre les profils d'aspirations présentés sur les Figure 54, Figure 55, Figure 56, Figure 57.

Il se crée alors une circulation globale entre le pied du bâtiment et son toit. Le pied qui éjecte de la matière peut être considéré comme une source et le toit qui « aspire » de l'aire peut être considéré comme un puits Figure 71.

Figure 70: Nuage revenant vers le bâtiment

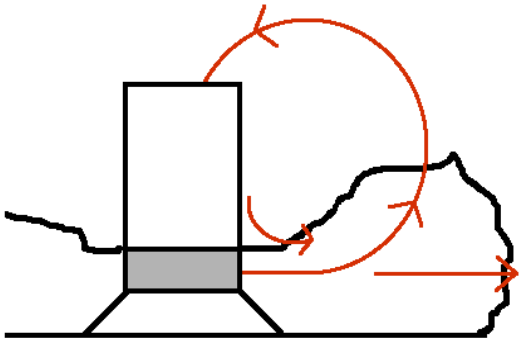


Figure 71: mouvement global du jet.

4.2.3 Intensité turbulente :

Notre analyse de la turbulence du jet nous a permis de définir l'intensité de turbulence et donc le terme k utilisé dans le modèle de simulation du type k-e. De plus, elle nous a permis de montrer qu'à un temps proche du décollement de couche limite les structures turbulentes tendent à disparaître pour laisser une place plus importante au phénomène de diffusion. La disparition des structures turbulentes est le signe que le niveau d'énergie nécessaire à l'entretien des structures rotatives tend à diminuer.

4.2.4 Granulométrie :

Les analyses des échantillons nous on permis de définir l'étendue granulométrique de la phase portée. Les estimations de concentration nous ont montrés que l'écoulement est très fortement chargé (plusieurs kg/m^3 à la source) et donc que pour la phase portée avait une influence sur la turbulence. Ainsi lors de simulation du phénomène il sera important d'intégrer la rétroaction de la phase portée sur la turbulence. C'est pourquoi il sera nécessaire d'envisager des simulations numériques lagrangiennes de l'écoulement. L'analyse des mécanismes d'effondrement nous a permis de montrer que la production de particules était liée au phénomène d'effondrement du bâtiment. Ainsi pour mieux quantifier les conditions sur l'injection de particules dans l'écoulement durant une simulation

numérique il sera nécessaire de mieux comprendre les mécanismes de l'effondrement.

La granulométrie des particules nous indique que les vitesses de chutes des particules en air calme sont très faibles. De plus les observations de l'écoulement nous on montré que dans les premiers instants l'écoulement avait tendance entrainer les particules du sol dans sont écoulement Figure 72. Ces points nous permettent de conclure sur le fait tant que l'écoulement est régi par la chute du bâtiment il n'y a pas ou peu de dépôts. Ce n'est qu'après, au moment où les vitesses de déplacement sont faibles que le dépôt peut s'effectuer. C'est pourquoi la plus grande partie des particules produite sera entrainée par le vent et ne se déposera pas.

Figure 72: sur la droite : coloration rose du nuage par de la terre

4.2.5 Causes du mouvement du nuage :

Le mouvement du jet, est intimement lié au mouvement du bâtiment, puisque c'est la seule source d'énergie disponible. Dans les tout premiers instants, il est dû à l'explosif, toutefois le volume de gaz généré par l'explosif n'est pas compatible avec le mouvement global du jet. En effet pour un bâtiment standard la quantité d'explosif employé (200 kg) ne dégage que 158 m^3 de gaz. Ce qui ne permet pas de développer un jet de 50 m de long et de 20 de hauteur.

Le mouvement du jet est dû à trois facteurs liés au bâtiment et à sont effondrement :

- Le premier : en s'effondrant, le bâtiment se déforme, il change de volume, l'air contenu en lui est chassé de la zone de déformation, principalement par les façades détruites. Au cours de l'effondrement, cet air sera aussi chassé dans les étages supérieurs par l'intermédiaire des cages d'escalier et des cages d'ascenseurs et dans le tas. En effet le tas est un milieu poreux

où se trouve probablement une grande quantité de particules issues de la fracturation du bâtiment. Ce mécanisme met en mouvement une quantité d'air quasiment égale au volume du bâtiment, soit pour un bâtiment de 20 m par 20 m par 50 m, 20000 m3 ;

- Le second : la viscosité de l'aire et la nécessité d'adhérence de l'aire à la paroi induisent qu'il va se former un gradient de vitesse induit par le mouvement des parois verticales. Les quantités d'air mises en mouvement par ce mécanisme sont faibles au regard des quantités mises en jeu par le précédent mécanisme ;

- Le dernier : Avant sont effondrement le bâtiment occupe un volume, or au cours de sont effondrement ce volume se libère. Cette disparition du bâtiment entraine que l'aire autour du bâtiment se déplace pour occuper le volume libéré, il est aspiré par le mouvement du bâtiment. Nous avons mis en évidence cette aspiration par les mesures de déplacement des nuages d'explosif. Cette aspiration est au moins égale au volume du bâtiment soit au moins 20 000 m3. C'est le mouvement d'air induit par cette aspiration qui permet de comprendre pourquoi le mouvement du nuage est entretenu bien après la fin de l'effondrement du nuage.

Au final, l'air contenu dans le bâtiment est expulsé par le bas du bâtiment, où il se charge en particule. Au niveau du toit du bâtiment, l'air est aspiré vers le bâtiment en mouvement.

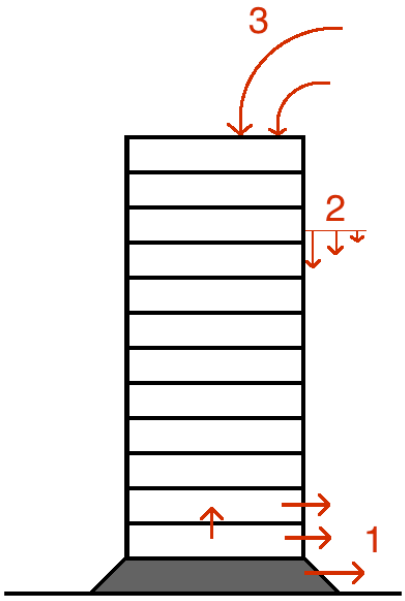


Figure 73: Les trois causes du mouvement du nuage de particules

5 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons exposé les différents résultats des mesures : de prélèvement de particules ; vidéo 2D ; 3D et les discussions que nous avons pu conduire par rapport à ces mesures.

Il ressort que la répartition du dépôt semble suivre un profil gaussien que les quantités déposées en jeu sont de l'ordre de plusieurs dizaines de tonnes pour un bâtiment de 20 m par 20 m par 50 m de hauteur. Que l'étendue granulométrique prélevée va de 0,1 à 300 µm. Cette étendue croisée avec les vitesses de chutes de particules en air calme nous fait penser que la majeure partie des émissions de particules ne se déposent pas dans un rayon proche du bâtiment. L'analyse chimique nous montre qu'à priori la composition des particules provient principalement du béton.

Les mesures vidéo 2D nous ont montré que l'effondrement des bâtiments ne pouvait pas être qualifié de chute libre car ils accélèrent puis décélèrent en fin de mouvement. La déformation des bâtiments se localise dans la partie basse de ceux-ci, et qu'elle ne semble pas se propager vers le haut. Nous avons montré par le procédé d'adimensionnalisation que malgré la différence entre les bâtiments il y avait un angle de comparaison possible. Angle de comparaison qui s'est confirmé lors de l'étude de la dynamique du nuage. Concernant ce denier, nous montrons que le nuage avait 3 phases de propagation et que les vitesses d'écoulement pouvaient atteindre 17 m/s. Le nuage prend la forme d'un jet avec des angles d'ouverture compris entre 20° et 30°. Les mesures de concentration nous indiqué que l'ordre de grandeur de la quantité de poussière était de plusieurs kg/m^3. Ce qui induit une rétroaction de la phase portée sur le développement de la turbulence de l'écoulement. Nous avons pu voir que les structures turbulentes évoluaient conformément aux différentes phases de l'écoulement. Les mesures vidéo nous ont aussi permis de mettre en évidence un phénomène d'aspiration dû au mouvement du bâtiment. Et nous avons pu étudier les fluctuations de vitesse induites par les tourbillons supérieurs à 10 cm.

Nous avons présenté les premiers résultats des mesures 3D qui représentent l'évolution de notre approche de mesure. Elles permettent de mieux définir la position du nuage par rapport au bâtiment et de mieux appréhender sa forme. Et offrent une possibilité de calage et de comparaison de champs de vitesse par rapport a la simulation numérique. Ce qui semble être un avantage non négligeable.

Pour finir, nous avons présenté les raisonnements que nous avons pu conduire sur le processus de démolition et la création des particules. Ainsi que sur le mouvement du nuage et sont lien par rapport au processus d'effondrement.

Les résultats exposés dans ce chapitre servent de base à notre approche de simulation. Ils sont donc utilisés dans le chapitre suivant.

PARTIE 3 : SIMULATION

Simulation numérique

Sommaire

1 Description du Code_Saturne : 168
1.1 Les niveaux d'utilisation du code : 168
1.2 Principes de résolution 169
2 Simulation 172
2.1 Description du domaine 172
2.2 Condition d'entrée de vitesse 172
2.3 Plan de simulation 176
3 Résultats 178
3.1 Cas d'un jet stationnaire. 178
3.2 Cas d'un jet à injection instationnaire 200
4 Conclusion 211

Ce chapitre présente les différentes étapes de la simulation numérique de la propagation des particules générées par la démolition de bâtiments à l'explosif. Son enjeu est d'obtenir un modèle numérique du problème suffisamment réaliste pour permettre une expérimentation numérique de solutions visant à contenir la dispersion des particules.

La difficulté est liée à la nécessaire simplification du problème permettant de le traiter numériquement tout en gardant une bonne représentativité du problème.

Nous présentons les principales étapes nécessaires à la simulation du phénomène à l'aide de Code_Saturne. La description de ce code de calcul se limite aux fonctions qui ont été exploitées. Nous procédons à une description des différents niveaux de configuration du code, puis exposons les principaux points de la résolution du système k-e.

Dans un second temps, nous exposons les principaux points de l'approche de simulation du problème. A savoir la manière dont le problème a été simplifié en décrivant le domaine et les conditions d'entrée de vitesse. Puis les évolutions envisagées pour arriver à un problème le plus proche possible.

Dans un troisième temps, nous exposons différents cas de simulations : le cas d'un jet stationnaire et instationnaire. Pour chacun de ces cas, l'ensemble des conditions aux limites et des différentes variables a été exposé.

Enfin, nous présentons les principales conclusions tirées des simulations ainsi que les principales critiques qui forment un ensemble de perspectives pour l'amélioration de la simulation du problème.

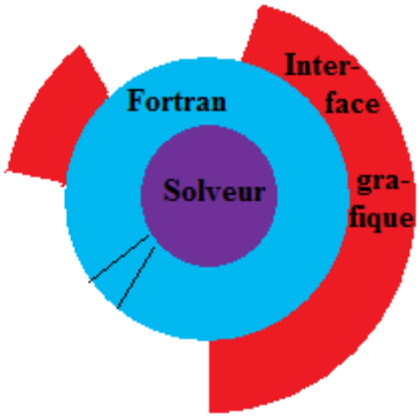
1 Description du Code Saturne :

Dans cette section, nous décrivons les principales caractéristiques du code saturne. Nous nous bornons aux aspects mis en œuvre lors du calcul. Nous avons simplifié la description afin de permettre une vue générale de la résolution. Pour plus de détails sur le code, il est nécessaire de se référer à la documentation voire au code source lui-même.

1.1 Les niveaux d'utilisation du code :

L'utilisation du code peut se faire sur trois niveaux :

- le solveur : il est constitué d'un ensemble de modules de base représentant les différents modèles disponibles de résolution. C'est à ce niveau que les systèmes d'équations sont définis, et discrétisés.
- Couche de configuration : elles permettent de définir l'ensemble des variables nécessaires à la résolution des modèles. C'est par cette couche que l'utilisateur définit son cas d'étude pour un modèle donné. Le langage utilisé est le fortran.
- L'interface graphique : elle a été conçue pour simplifier l'utilisation du code. Elle se borne à permettre la définition par un mode graphique les différentes variables des routines de configurations. Elle est une représentation partielle des possibilités de configuration disponible dans la couche de configuration.



Lors du lancement d'un calcul, suivant les configurations définies, un ensemble de modules de bases et de routines de configurations est compilé en un exécutable qui résoudra le calcul défini. Ce choix permet de réduire significativement la taille des exécutables mis en œuvres lors du calcul. Il permet aussi de modifier les modèles disponibles et d'en implémenter de nouveau.

1.2 Principes de résolution

Dans cette partie, nous présenterons les principaux éléments qui ont été utilisés lors de nos simulations numériques. Ces éléments se décomposent en deux ensembles. Le premier représente les principales routines du solveur qui ont été utilisées. Le second représente les routines de configuration qui ont dû être modifiées.

Nom	position	Description
Navsto	Solveur	dans ce sous-programme les équations du mouvement sont discrétisées et résolues
Turbke	Solveur	Modèle k-e pour le traitement de la turbulence
Usclim	Configuration	Définitions des conditions aux limites utilisées.

Le système résolu est constitué des équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement, qui seront traitées dans la routine navsto et des équations pour les variables k et epsilon qui sont traités dans la routine Turbke. Ces fonctions appellent d'autres fonctions qui complèteront la résolution du système. Dans cette partie nous ne décrirons que brièvement les trois routines présentées.

1.2.1 Sous-programme navsto : équations du mouvement

On s'intéresse à la résolution du système d'équations de Navier Stokes tridimensionnel monophasique, à une pression, instationnaires, en incompressible ou faiblement dilatable, basées sur une discrétisation temporelle de type Euler implicite d'ordre 1 ou Crank-Nicolson d'ordre 2 et sur une discrétisation spatiale par des volumes finis colocalisés.

Équations du mouvement

$$\begin{cases} \dfrac{\partial}{\partial t}(\rho \underline{u}) + div(\rho \underline{u} \otimes \underline{u}) = div(\underline{\underline{\sigma}}) + \underline{TS} - \underline{\underline{K}}\underline{u} \\ div(\rho \underline{u}) = \Gamma \end{cases} \qquad \text{Eq. 80}$$

Avec :

- ρ la masse volumique
- $\underline{u}$ le champ de la vitesse
- $\underline{\underline{K}}$ est un tenseur diagonal positif
- $\underline{TS} - \underline{\underline{K}}\underline{u}$ représente les termes sources.
- $\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{\tau}} - P\underline{\underline{I_d}}$ est le tenseur des contraintes
- $\underline{\underline{\tau}} = 2\mu\underline{\underline{D}} + \left(\kappa - \frac{2}{3}\mu\right) tr(\underline{\underline{D}})\underline{\underline{I_d}}$ est le tenseur des contraintes visqueuses

- μ est la viscosité dynamique
- κ est la viscosité de volume (égale à 0 en incompressible)
- $\underline{\underline{D}} = \frac{1}{2}\left(\underline{\underline{grad}}\,\underline{u} + {}^{t}\underline{\underline{grad}}\,\underline{u}\right)$ est le tenseur des taux de déformation.
- Γ est le terme source massique.

Discrétisation

Les variables vitesses et pression de ce problème, sont calculées, à un pas de temps donné, en procédant en deux étapes issues d'une décomposition des opérateurs (méthode à pas fractionnaires).
Les variables sont supposées connues à l'instant t_n et on cherche à les déterminer à l'instant t_{n+1}. Soit $\Delta t_n = t_{n+1} - t_n$ le pas de temps associé. Dans un premier temps, on réalise l'étape de prédiction de la vitesse en résolvant l'équation de quantité de mouvement avec une pression explicite. Suis l'étape de correction de la pression (ou projection de la vitesse) qui permet d'obtenir un champ de vitesse à divergence nulle.

1.2.2 Le sous-programme turbke

Le but de ce sous-programme est de résoudre le système des équations de k et de ε de manière semi-couplé.

Equations :

$$\begin{aligned}\rho\frac{\partial k}{\partial t} &= D(k) + S_k(k,\varepsilon) + k\,div(\rho\underline{u}) + \Gamma(k_i - k) + \alpha_k k + \beta_k \\ \rho\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} &= D(\varepsilon) + S_\varepsilon(k,\varepsilon) + \varepsilon\,div(\rho\underline{u}) + \Gamma(\varepsilon_i - \varepsilon) + \alpha_\varepsilon \varepsilon + \beta_\varepsilon\end{aligned} \qquad \text{Eq. 81}$$

D est l'opérateur de convection/diffusion.
S_k et S_ε sont les termes source de k et de ε respectivement.
Γ est un éventuel terme source de masse.
k_i et ε_i sont les valeurs initiales k et de ε respectivement.

Discrétisation

La résolution se déroule en trois étapes, afin de coupler partiellement les deux variables k et ε

- Première phase : Bilan explicite
- Deuxième phase : couplage des termes sources
- Troisième phase : implication de la convection/diffusion

1.2.3 Les conditions aux limites : usclim

Cette routine est appelée à chaque pas de temps. Quand l'interface graphique est utilisée, usclim est configuré automatiquement. Toutefois, la modification de cette routine est nécessaire pour définir des conditions aux bords qui sont complexes, exemple : un profil d'entrée d'une condition variable dans le temps. Quand l'interface graphique n'est pas utilisée, toutes les conditions aux bords doivent être spécifiées dans usclim.

Le codage des conditions aux limites standard

- Pour une entrée (ITYPFB = IENTRE) : On a une condition de flux nul pour la pression et des conditions de Dirichlet pour toutes les autres variables. Ces conditions sont données par l'utilisateur.
- Pour un mur solide imperméable et avec frottement (ITYPFB = IPAROI) : L'éventuelle vitesse de mouvement peut être donnée avec zéro comme condition initiale. Pour les autres scalaires, deux sortes de conditions aux bords peuvent être définies : on impose soit une valeur du scalaire sur le mur soit une un flux. Si l'utilisateur ne complète pas les vecteurs concernés, le code prend un flux nul comme valeur par défaut.
- Pour une symétrie ou un mur sans frottement : (ITYPFB = ISYMET)
- Pour une sortie à flux nul (ITYPFG = ISOR09) : si le flux de masse est sortant, une condition de flux nul pour les scalaires et la vitesse est imposée. Si le flux de masse est entrant, une condition de flux nul pour les scalaires est imposée, et une valeur nulle pour la vitesse est imposée sur la face.
- D'autres types de sorties peuvent aussi être définis.

Le codage des conditions aux limites non standard

Si la face ne correspond pas à un type standard, l'utilisateur doit remplir les matrices ITYPFB, ICODCL et RCODL comme il suit :
On note IFAC la référence de la face sur laquelle on impose la condition, et par IVAR la variable considérée.

- ICODCL (IFAC, IVAR) = 1 : condition de Dirichlet
- ICODCL (IFAC, IVAR) = 3 : condition de flux
- ICODCL (IFAC, IVAR) = 4 : condition de symétrie
- ICODCL (IFAC, IVAR) = 5 : condition de frottement
- ICODCL (IFAC, IVAR) = 9 (respectivement 10) : condition de sortie libre pour la vitesse (respectivement pour les autres variables)

Le code revoit automatiquement la compatibilité entre les conditions aux limites. Les règles suivantes doivent être respectées :

- Sur chaque face, les mêmes composantes de la vitesse doivent avoir le même type de conditions. De même pour les R_{ij}
- Si on impose des conditions de cisaillement (slipping) pour la vitesse, on doit imposer des conditions de symétrie pour les R_{ij} et vice versa.

- Si on impose des conditions de frottement pour la vitesse, on impose de même pour les conditions sur les quantités turbulentes.
- Si on impose une condition de frottement pour un scalaire, on doit faire de même pour la vitesse.

2 Simulation

2.1 Description du domaine

2.1.1 Le phénomène :

Dans notre étude, nous nous sommes principalement intéressés à des bâtiments de section carrée de 20 m de côté et de 45 à 55 mètres de hauteur.

Le nuage se propage depuis les 4 faces sous la forme d'un jet ayant pour angle d'ouverture verticale 30° et latérale 20° . Il atteint une distance de 50 m au bout de 8 s.

La vitesse d'avancée du front du nuage varie de 17 m/s à 0 m/s. Les particules entrainées ont une granulométrie comprise entre 300µm et 0,1µm. Les concentrations en particules sont de l'ordre de 4kg/m^3 à l'entrée.

La propagation sous forme de jet dure 5 secondes. L'écoulement est pleinement turbulent, instationnaire et en cours d'établissement. L'intensité de turbulence est comprise entre 0,4 et 0,6.

2.2 Condition d'entrée de vitesse

Pour définir la condition d'entrée des vitesses, nous avons procédé à deux approches différentes : la première à partir de la dynamique de chute du bâtiment ; la seconde à partir de l'avancée du jet.

2.2.1 Evaluation de la vitesse fondée sur la dynamique du bâtiment

Comme nous l'avons montré dans le chapitre précédent, le mouvement du bâtiment est à l'origine du mouvement du nuage de particules. En effet, il met l'air en mouvement par trois mécanismes : l'éjection de l'air contenu dans le bâtiment, l'entrainement de l'air par les parois du bâtiment et l'aspiration de l'air par la disparition du bâtiment. Tant que le bâtiment accélère le mécanisme prédominant de mise en mouvement du nuage est l'éjection de l'air contenu dans le bâtiment. Quand le bâtiment ralentit, l'air mis en mouvement par l'aspiration tendra à compenser la perte de débit par éjection. Le mécanisme d'entrainement de l'air par les parois est négligeable en raison de la faible viscosité de l'air et de l'ordre de grandeur mis en jeu par l'éjection du bâtiment.

Pour définir la vitesse d'éjection de l'air, il suffit de faire le rapport entre la surface d'éjection et la surface au sol du bâtiment. Dans notre cas et au vu des mesures effectuées, nous allons considérer que la hauteur d'éjection est constante au cours du temps. La vitesse d'éjection du mélange air-particule prendra la forme :

$$V_{éjection} = \frac{S_{sol}}{S_{éjection}} \cdot V_{chute} \qquad \text{Eq. 82}$$

L'influence de l'aspiration sur la vitesse à l'entrée du jet est plus difficile à quantifier. On peut toutefois noter que l'air mis en mouvement ne peut pas aller plus vite que la vitesse maximum atteinte par le bâtiment. Il apparaît donc que cet air ne peut être contributif qu'à partir du moment ou le bâtiment ralentit. Et on peut estimer que cette contribution sera significative jusqu'au moment où le jet subira le décollement de couche limite.

Prenons le cas d'un bâtiment 20 m par 20 m par 50 m et ayant une hauteur d'éjection de 5 m. La surface au sol sera de 400 m2 et sa surface d'éjection sera de 400 m2. La vitesse d'éjection suivra donc la vitesse du bâtiment. Les bâtiments de cette taille atteignent une vitesse de chute de 20 m/s au bout de 3 s et l'effondrement prend fin au bout de 3,5 s. La vitesse d'éjection aura donc pour allure celle représentée sur la Figure 74.

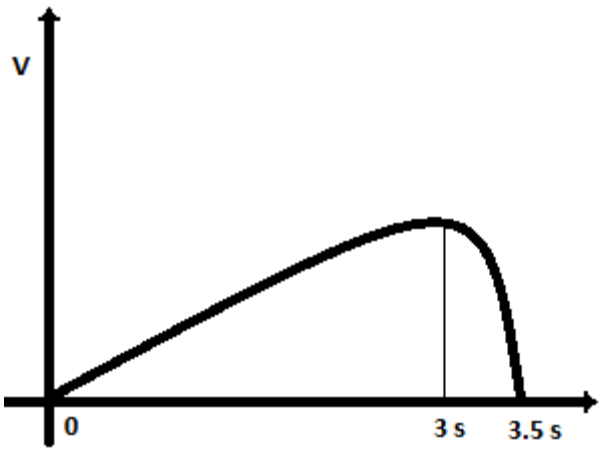


Figure 74: Profil de la vitesse d'éjection.

Ce profil sera corrigé en maintenant la vitesse d'éjection au maximum pendant 4,5 s en raison du décollement. En effet, il se produit entre 4,5 s et 5 s. A partir de ce moment, elle sera ramenée à 0 de 4,5 s à 5 s. Le profil obtenu est présenté sur la Figure 75.

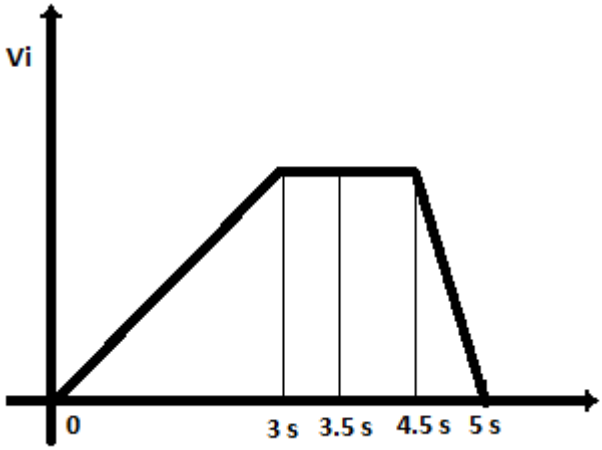
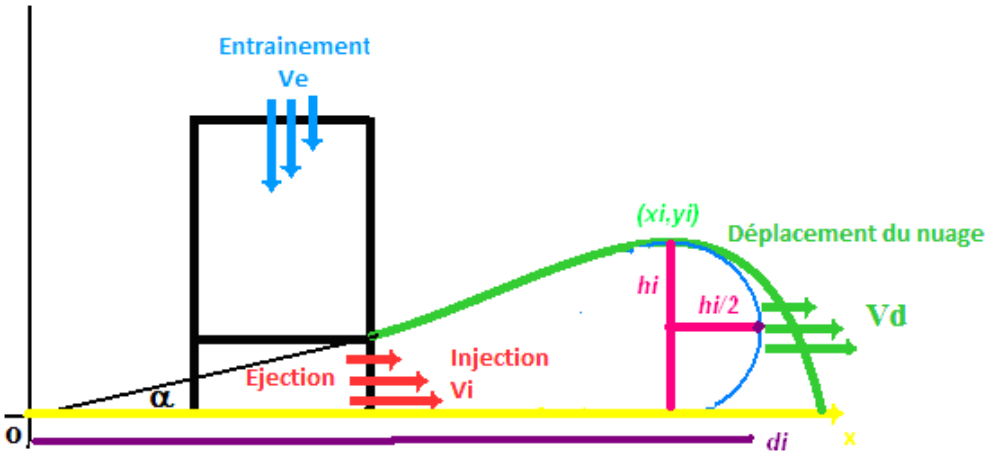


Figure 75: Profil de vitesse corrigé par l'influence de l'aspiration.

Nous obtenons donc un profil qui variera de 0 à 20 m/s pendant les 3 premières secondes puis qui sera constant durant 1,5 s puis passe de 20 m/s à 0 en 0,5 seconde. Bien évidemment, la vitesse maximum peut varier suivant le cas étudié.

2.2.2 Evaluation de la vitesse d'entrée fondée sur le déplacement du nuage

En tenant compte de la géométrie du jet et de la position de son front au cours du temps, il devient possible en appliquant le principe de la conservation du débit en différentes sections, d'avoir une évaluation de la vitesse d'entrée du jet.



Dans notre cas en raison des différents relevés, nous allons considérer que la forme du jet suit la même évolution au cours du temps. De ce fait, deux sections différentes S1 et S2 de ce cône auront les mêmes bornes d'intégration et pour expression :

$$S_1 = R_1^2 \int_{\varphi=0}^{\varphi=\beta} \int_{\theta=0}^{\theta=\alpha} \sin\theta \, d\theta \, d\varphi$$
$$S_2 = R_2^2 \int_{\varphi=0}^{\varphi=\beta} \int_{\theta=0}^{\theta=\alpha} \sin\theta \, d\theta \, d\varphi \qquad \text{Eq. 83}$$

En considérant que les débits à travers ces deux sections sont égaux, on peut écrire :

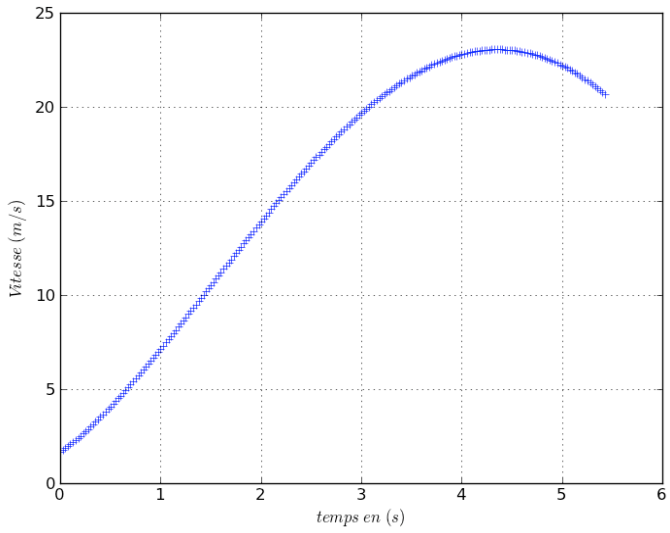
$$V_i = \frac{S_2}{S_1} V_d = \frac{R_2^2}{R_1^2} V_d = \frac{h_2^2}{h_1^2} V_d \qquad \text{Eq. 84}$$

En connaissant l'évolution de la hauteur au cours du temps et la vitesse de déplacement du point le plus haut, il devient possible de déterminer la vitesse d'injection du mélange air-particules.

Dans notre cas, nous connaissons l'évolution de la position du front du nuage au cours du temps et l'évolution de sa hauteur. Comme nous assimilons le front du nuage à un demi-cercle, nous pouvons déterminer la vitesse du point haut par :

$$V_d = \frac{d}{dt} f_{front}(t) - \frac{1}{2} \frac{d}{dt} h(t) \qquad \text{Eq. 85}$$

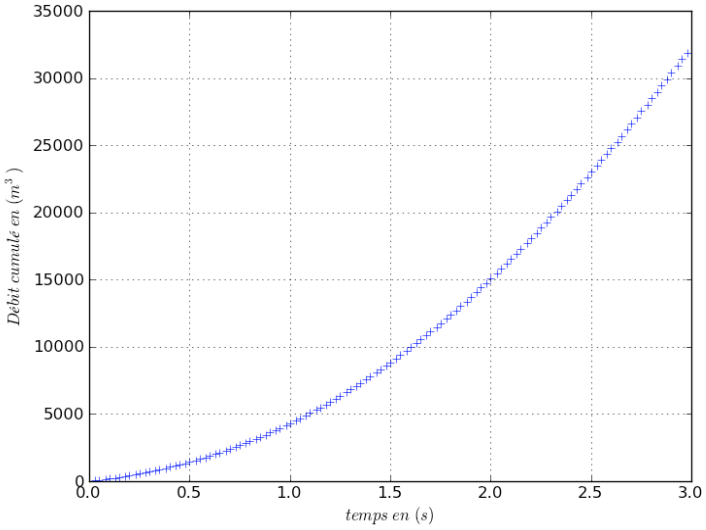
Ce qui avec les informations recueillies, nous amène au résultat présenté sur la courbe suivante



Cette vitesse décroit à partir de 4.5 s, ce qui correspond au moment du décollement de la couche limite qui est observé dans les sites de démolition. Elle ne commence pas par zéro. En effet, lorsque le bâtiment touche le sol, il a déjà une vitesse. La vitesse minimale d'injection est de 1.6 m/s à t = 0 s. La vitesse maximale est de 23 m/s à t = 4.35 s.

Dans le but de vérifier que le profil d'injection de la vitesse est crédible, nous avons procédé à l'évaluation du volume de matière injectée dans le domaine de

calcul à la fin de la chute du bâtiment (3.2 s). Il doit être à peu près égal au volume du bâtiment qui est 32 000 m^3 à 2 000 m^3 près. (% d'erreur de 6.25 %). En considérant une hauteur d'injection de 10 m, la surface d'injection de tout le bâtiment est le produit du périmètre du bâtiment par la hauteur d'injection et vaut 614 m^2. On obtient la courbe d'évolution du débit au cours du temps en multipliant cette surface par la vitesse instantanée. La courbe d'augmentation des volumes est calculée en multipliant ce débit par le pas de temps de 0,5 s. Les volumes cumulés sont obtenus par la somme des augmentations des volumes.



Au bout de 3.1 s le volume total éjecté est de 35 000 m^3. On considère ce résultat conforme avec les hypothèses :

- Le pourcentage d'erreur en temps est de 3.15 % ;
- Le pourcentage d'erreur en volume est de 8.31 % ;

2.3 Plan de simulation

L'idée de notre approche de simulation est de simplifier le problème, afin de correctement approcher les mécanismes de base et de caler les principales variables des modèles numériques. Au fur et à mesure nous augmenterons la complexité du problème pour arriver à un cas de simulation le plus proche possible de la réalité.

2.3.1 Simplification du cas:

Nous ne nous intéresserons qu'aux bâtiments à section carrée de 20 m par 20 m et de hauteur comprise entre 45 et 55 m. Dans ces conditions, il est raisonnable de penser que les jets issus des quatre faces sont équivalents. Nous pourrons donc restreindre le début de l'étude à l'étude de l'écoulement généré par une face du bâtiment. Nous considèrerons, en raison des différentes mesures effectuées que le jet est symétrique. Ainsi, nous restreindrons le début de l'étude à un écoulement 2D. Ni le mouvement du bâtiment ni la formation du tas ne seront pris en

compte dans un premier temps, ainsi que le caractère multiphasique de l'écoulement.

2.3.2 Ordonnancement des simulations :

Le plan de simulation est organisé en deux structures. Une globale qui permet de définir les principales étapes de la simulation et une sous-structure qui s'applique à chacune des étapes de la structure globale. Ceci afin de garantir une difficulté croissante et une approximation des différentes variables au cours des étapes.

Structure globale :

La structure globale du plan de simulation est organisée de façon à aller d'un modèle simplifié vers un modèle plus complexe. L'enchainement des étapes est représenté sur la Figure 76.

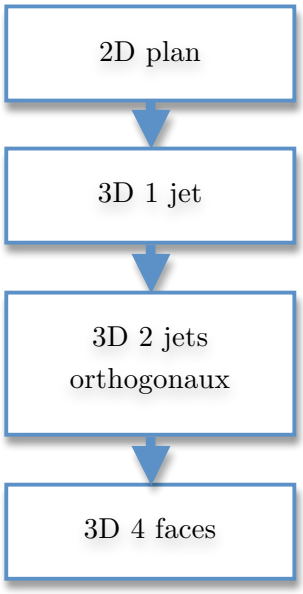


Figure 76 : organisation globale de la simulation

Structure d'un cycle :

C'est l'enchainement prévu pour chaque étape de la simulation. Il est possible que certains éléments soient redondants d'une étape à l'autre, mais la complexité du problème ne nous permet pas de garantir qu'il n'est pas nécessaire de faire la totalité de cet enchaînement. En fonction des difficultés rencontrées, il sera probablement nécessaire d'étoffer cet enchaînement.

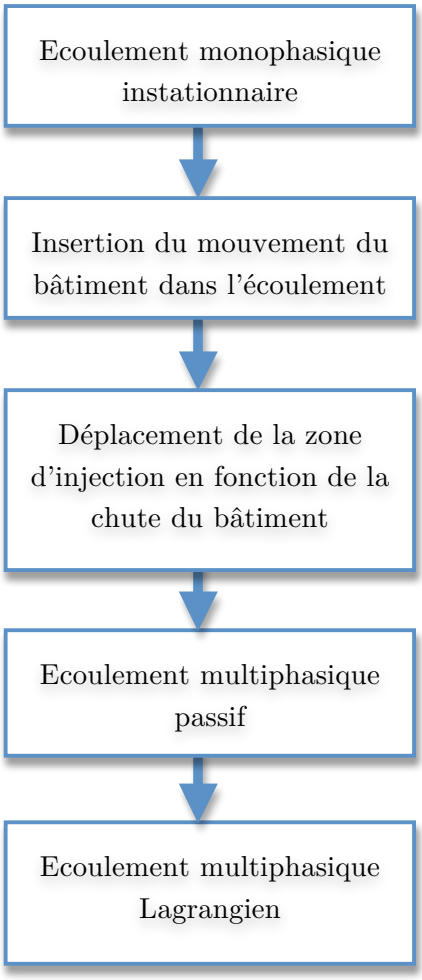


Figure 77 : Structure au sein d'une étape

3 Résultats

3.1 Cas d'un jet stationnaire.

Ce premier cas n'est pas à proprement parler dans le plan de simulation. Il a pour objectifs : la familiarisation avec l'utilisation du code de calcul et de la suite d'outils, ainsi que la vérification des dimensions du domaine.

3.1.1 Géométrie

Forme

Code_Saturne traite les problèmes 2D en partant d'un maillage 3D dont la profondeur représente une maille. Les deux faces orthogonales à la profondeur auront pour conditions une condition de type symétrie.

La géométrie consiste en un domaine parallélépipédique en trois dimensions. Ce domaine est partitionné en trois régions à l'aide de deux plans horizontaux. Cette partition servira à définir les conditions aux limites et à mettre en place différentes conditions de discrétisation pour le domaine.

Figure 78 : Géométrie du jet stationnaire

Dimensions

Les dimensions du domaine et les positions des plans de partition sont données dans le tableau ci-dessous :

Largeur	1 km
Hauteur	200 m
Profondeur	1 m
Plan de partition 1 : à la hauteur de	7 m
Plan de partition 2 : à la hauteur de	25 m

Figure 79 : dimension du domaine instationnaire

Le plan de partition 1 va servir pour la définition de la zone d'entrée et le plan de partition 2 pourra être utilisé pour raffiner le maillage dans une région donnée et, ou pour imposer différentes conditions aux limites sur différentes parties de la même verticale.

La hauteur du plan de partition 1 est prise comme étant la hauteur moyenne des zones d'injections des bâtiments étudiés et la hauteur du plan de partition 2 est la moitié de la hauteur du bâtiment. C'est lorsqu'une telle hauteur reste lors de la descente du bâtiment que le nuage commence à revenir vers le bâtiment.

La deuxième étape de la construction de la géométrie est la création de groupes de segments pour imposer les conditions de discrétisation et de créer des groupes de faces pour imposer les conditions aux limites, une fois le maillage importé dans Saturne. Les différents groupes de côté sont montrés dans la figure ci-dessous :

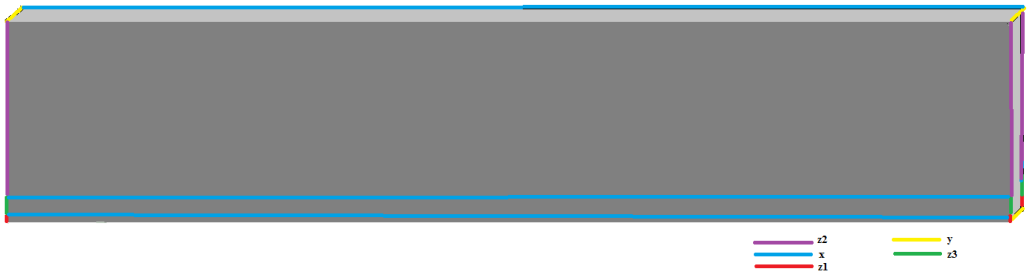


Figure 80 : segments de discrétisation

Le regroupement des faces est montré dans la figure ci-dessous

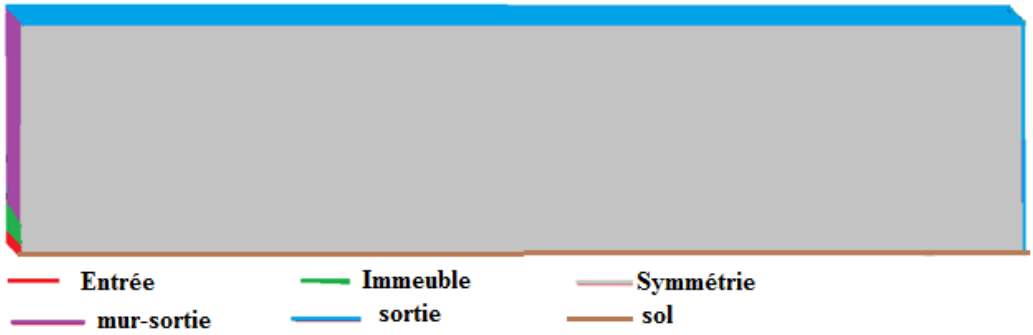


Figure 81 : Regroupement des faces

3.1.2 La discrétisation

Discrétisation des segments

Le détail de la discrétisation des segments est montré dans le tableau suivant :

Coté	Méthode de discrétisation	Hypothèses
x	Distribution arithmétique	Longueur entre 0.5 et 2
y	Nombre de segments, distribution équidistante	1
z1	Distribution arithmétique	Longueur entre 1 et 2
z2	Longueur du sous segment	0.1
z3	Distribution arithmétique	Longueur entre 0.1 et 1

Figure 82 : Discrétisation

Passage à 3 D

Comme marqué dans le tableau ci-dessus il n'y a pas de division sur la profondeur du domaine. C'est parce que le modèle conçu est bidimensionnel et la dimension de profondeur est utilisée pour pouvoir passer le calcul dans saturne qui n'est pas compatible avec les domaines plans.

La profondeur est une coordonnée supplémentaire de passage à un espace de plus grande dimension. Ce passage est connu mathématiquement par les coordonnées homogènes : pour avoir une injection canonique d'un espace vectoriel E de dimension n dans un espace vectoriel F de dimension m > n, sous certaines conditions, on peut créer un espace vectoriel G contenant des vecteurs obtenus à partir des vecteurs de E en ajoutant (m-n) composantes fixes (d'habitude on les prend toutes nulles). L'espace vectoriel G sera contenu dans F et isomorphique à E, il a donc exactement les mêmes propriétés algébriques de E. On peut considérer les deux espaces E et G identiques.

Maillage

Le maillage résultant est constitué de mailles rectangulaires fines dans la zone d'entrée et devenant de plus en plus grossières en s'éloignant du sol. Les propriétés de ce maillage sont montrées dans la figure ci-dessous :

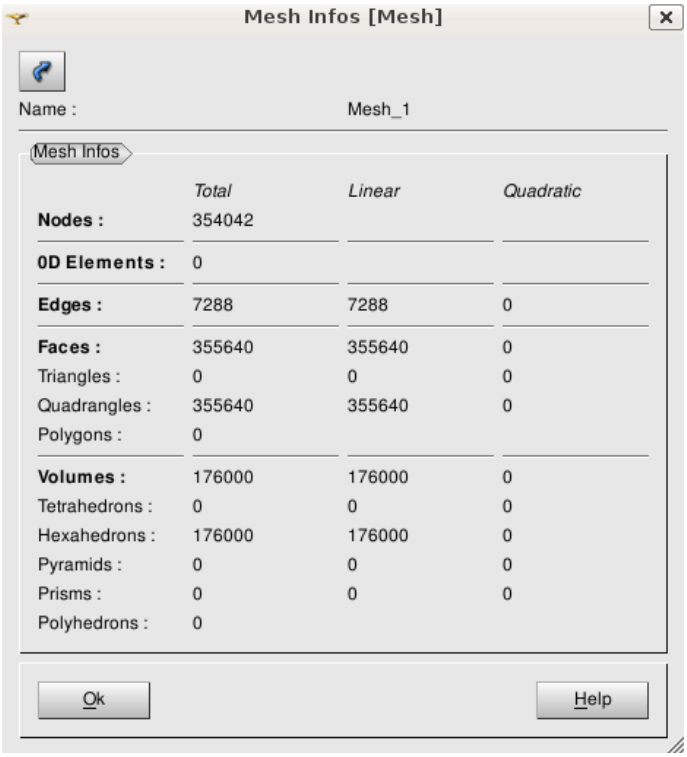


Figure 83 : détaille du maillage, stationnaire

La dernière étape du maillage est la création de groupes de faces correspondant aux groupes de faces de géométrie définis dans l'étape précédente. Le maillage obtenu est exporté en un fichier .med. C'est à travers ce fichier que les données sur le maillage obtenu peuvent être utilisées pour faire une simulation numérique.

3.1.3 Configuration et lancement du calcul

Dans cette section, nous décrirons la configuration de ce calcul, tel qu'il apparaît dans l'interface graphique du code dans sa version 1.32. Nous ne détaillerons pas la création d'un cas d'étude, ni la reprise d'un précédent cas. Nous supposerons donc que nous avons démarré l'interface graphique et que nous avons correctement défini les chemins d'accès aux maillages.

Le calcul se fait avec Code_Saturne 1.32. La première étape est de créer un nouveau cas d'étude et d'importer le fichier .med qui contient les informations sur le maillage. Chaque cas de calcul est formé des étapes suivantes :

Définition de l'environnement du calcul

Dans cette section nous pouvons :

- modifier les chemins d'accès aux maillages et aux différents fichiers ;
- choisir les maillages à utiliser et définir les éventuelles zones de recollement de maillage ;
- définir les zones volumiques du calcul.

Le préprocesseur du code lit les détails du maillage et fait s'il y a besoin les recollements de maillages et le découpage des faces. Si des groupes de faces sont définis dans le maillage, il les reconnaîtra et les utilisera par défaut dans le calcul.

Modèles thermophysiques

C'est dans cette partie que les propriétés physiques : particulières ; turbulentes ; thermiques ; sont introduites. L'initialisation de certaines variables et quelques propriétés dans le cas du maillage mobile, sont effectuées à ce niveau. Nous retrouvons, dans notre cas :

- Physiques particulières :
    - Type de l'écoulement : Stationnaire
    - Ecoulement monophasique
- Modèle de turbulence : k epsilon
- Initialisation des variables dans toutes les cellules :
    - Initialisation des composantes des vitesses : 0 m/s
    - Initialisation de la turbulence : Initialisation globale par vitesse de référence de 1 m/s

Propriétés physiques

- Valeur de référence de la pression : 101300 Pa
- Caractéristiques du fluide :
    - Masse volumique constante de : 1.17862 kg/m^3
    - Viscosité dynamique constante de: 1.83 x 10^{-5} kg/m/s
    - Chaleur spécifique constante de: 1017.24 J/Kg/K
    - Pression hydrostatique interpolée en écoulement stratifié d'une façon standard.

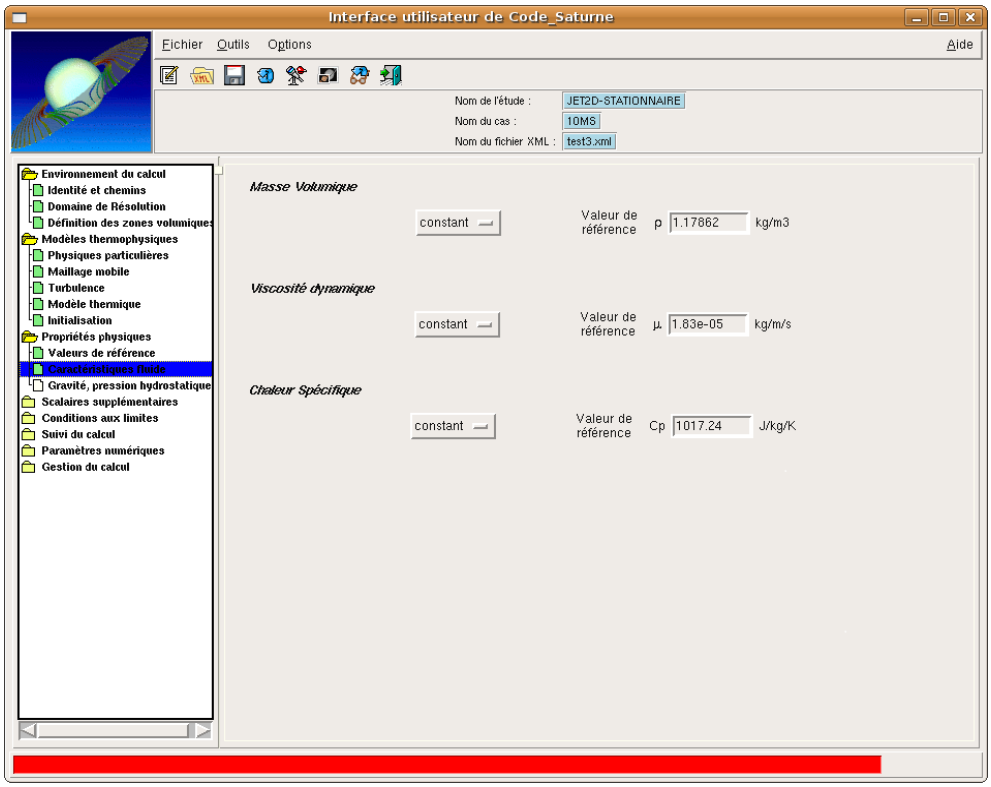


Figure 84 vue de la fenêtre de propriétés physiques

Scalaires supplémentaires :

Dans cette section, il est possible d'ajouter un certain nombre de scalaires passifs supplémentaires qui seront ajoutés à l'entrée du domaine. Cela peut être des conditions de l'évolution de la température ou autre. Dans notre cas nous n'avons aucun scalaire supplémentaire à ajouter.

Conditions aux limites

- Définition des frontières. On identifie le type des conditions aux limites de chaque groupe de faces déjà défini dans le maillage, il est toutefois possible de les définir à partir d'un maillage qui n'aurait pas de groupe de faces.

Zone	Conditions aux limites
Entrée	entrée
Immeuble	paroi
Mur-sortie	paroi
Sortie	sortie
Symétrie	Symétrie
Sol	paroi

Tableau 17 : Conditions aux limites

- Variables dynamiques. Les propriétés pour les zones d'entrées et les parois peuvent être données dans cette étape :

  - La paroi est une paroi lisse
  - On impose une vitesse dans la zone d'entrée suivant x et ayant une intensité de 10 m/s
  - On impose un diamètre hydraulique de 1 m pour la turbulence.
- Scalaire : on n'introduit pas de scalaires dans ce calcul

Suivi du calcul

Dans cette étape on donne les propriétés du calcul itératif, du format du fichier de sortie, ainsi que les variables qu'on veut avoir dans ce fichier de sortie

- Gestion du stationnaire : le calcul se fait avec un coefficient de relaxation de 0.9;
- Contrôle des sorties :
  - Listing : c'est un fichier généré par le code qui contient différents détails du calcul qui a été fait.
  - Post traitement : On peut choisir de faire un post traitement à la fin du calcul ou durant le calcul, pour le domaine fluide tout entier ou bien pour les faces de bord seulement.
  - Format du fichier : le fichier de sortie peut être écrit sous différents formats suivant le type d'outils de post traitement a disposition.

Paramètres numériques

Les paramètres numériques sont divisés en deux sous ensemble :

- Paramètres d'équations : ce sont les schémas utilisés pour la résolution numérique des différentes composantes de la vitesse et des grandeurs turbulentes.

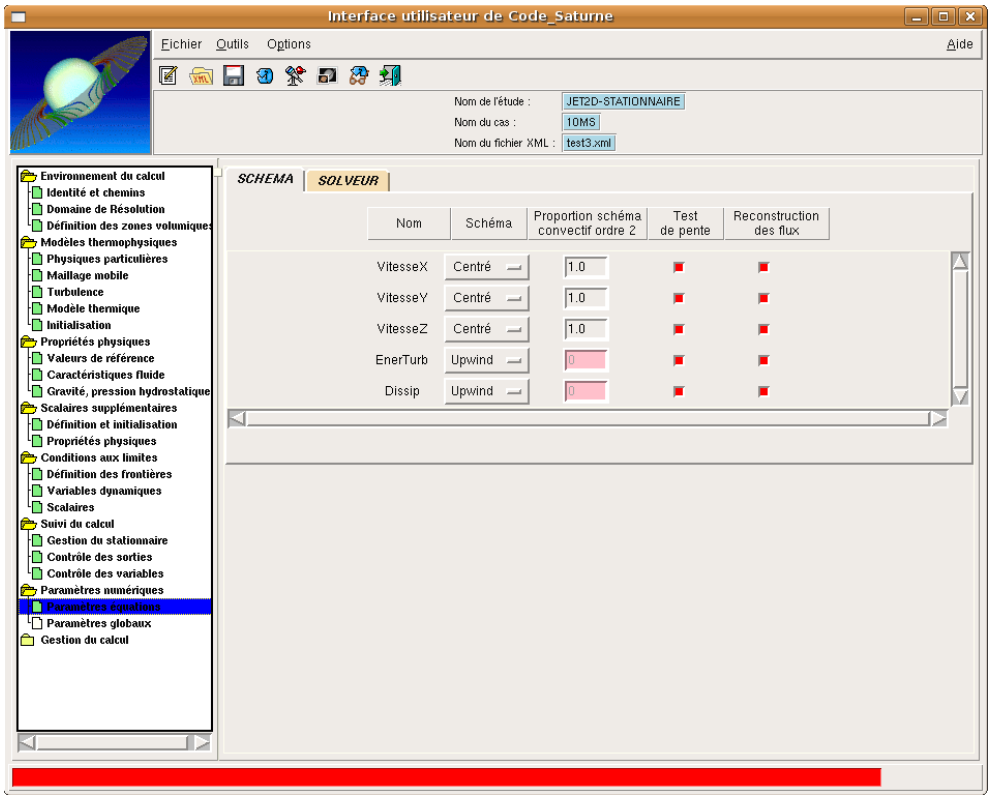


Figure 85 : Paramètres numériques

- Paramètres globaux : pour le calcul des pressions, on précise :
    - Si on prend en compte des termes sources en gradient transposé et divergence de vitesse (oui par défaut)
    - Si on met en place un pseudo – solveur de vitesse pression (non par défaut)
    - Le schéma d'extrapolation du gradient de vitesse au bord (on choisit un schéma de Neumann d'ordre 1)
    - Le coefficient de relaxation de l'incrément de pression (1)
    - Le calcul des gradients (reconstruction itérative des non-orthogonalités par défaut)

Gestion du calcul :

Dans cette étape, on définit le type de machine disponible (mémoire, nombre de processeurs) et on lance la compilation de l'exécutable qui servira à la résolution du calcul.

3.1.4 Post traitement

Plusieurs post processeurs peuvent être utilisés pour visualiser les résultats par exemple : Salome et Paraview. Le présent post traitement, est fait sous Paraview. Les résultats présentés sont la distribution de la norme de vitesse dans le domaine de calcul, et les profils de la norme de vitesse et de ses différentes composantes

sur des lignes verticales et horizontales prises dans différentes positions du domaine.

Distribution globale de la vitesse

La distribution de la vitesse dans le domaine de calcul est montrée dans la figure ci-dessous :

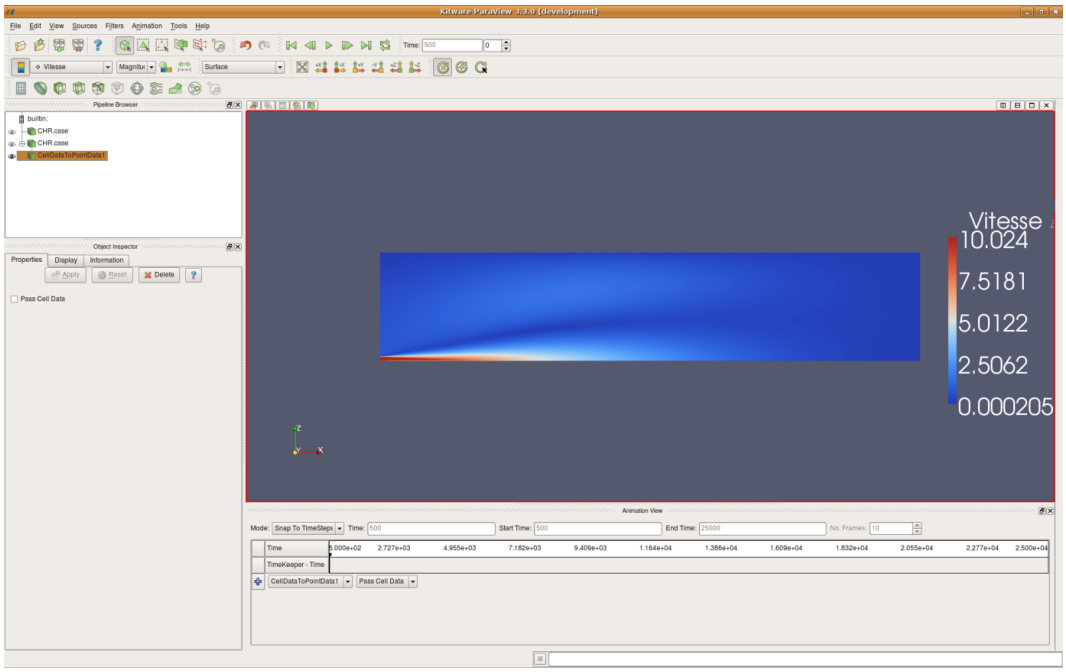


Figure 86 : Distribution globale de la vitesse

Nous pouvons voir que la vitesse est presque nulle dans le domaine loin de la face d'entrée. Ceci est dû au fait que le domaine de calcul est très grand par rapport au phénomène que l'on veut étudier. Un demi-cône, où la vitesse est maximum, s'est établi à partir de la zone d'entrée, c'est le cône d'établissement du jet. Dans ce cône la vitesse correspond à la vitesse d'entrée. Globalement, la vitesse décroit en s'éloignant en hauteur et en distance de la zone d'entrée. Et le jet prend la forme d'un demi-cône centrée sur la zone d'entrée.

Ces observations sont conformes avec les observations dans les sites de démolition et avec les hypothèses physiques des jets. En effet, il est normal que la vitesse maximale atteinte soit à peu près égale à la vitesse d'injection dans la zone d'établissement du jet et que la vitesse du jet décroisse en s'éloignant de la zone d'entrée. Nous avons observé dans les sites de démolition que le jet prend une forme conique pendant les premières secondes.

Toutefois cette simulation à ses limitations du point de vue numérique et physique. Le domaine utilisé est trop grand.Le temps de calcul pourrait être économisé en révisant les dimensions du domaine. Sur les sites étudiés, le jet a une forme conique au début de l'écoulement, on remarque un retour du jet vers le bâtiment et un décollement de couche limite. Ce modèle ne rend pas compte de

ces deux derniers éléments. Ce modèle ne peut être utilisé que pour représenter juste le début du phénomène.

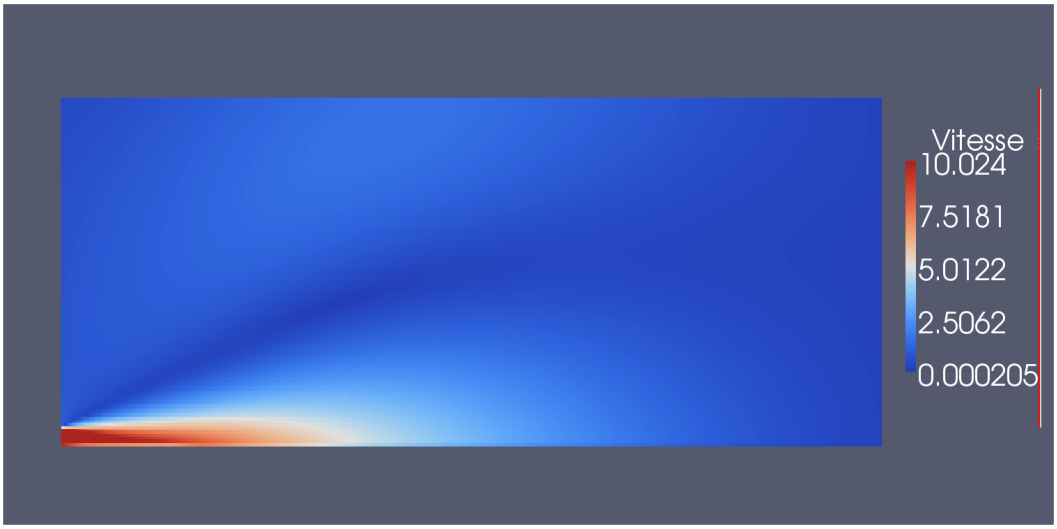


Figure 87 : Distribution de la vitesse dans la zone d'injection

Etude des composantes de la vitesse

Les différentes composantes de la vitesse sont projetées sur des segments de coupes placées en différents endroits du domaine. Nous considérons le repère orthonormé xyz montré dans la figure ci-dessous, pour définir la position de ces segments de coupe.

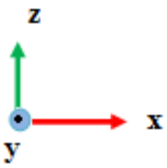


Figure 88 : sens du repère

Les graphiques des composantes de la vitesse, ont été tracé suivant l'axe des x et l'axe des z sur les lignes situées à x=10, 20, 50, 75 et 150 m de l'entrée et à z= 3.5, 5 et 10 m du sol. Les figures suivantes présentent la disposition de ces segments. Les segments verticaux on une longueur de 20 m et les segments horizontaux on une longueur de 300 m.

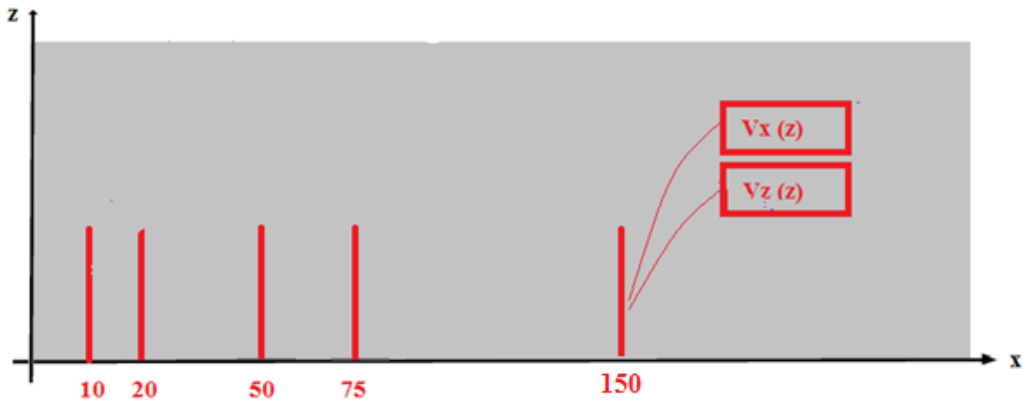


Figure 89 : lignes de traçage verticales

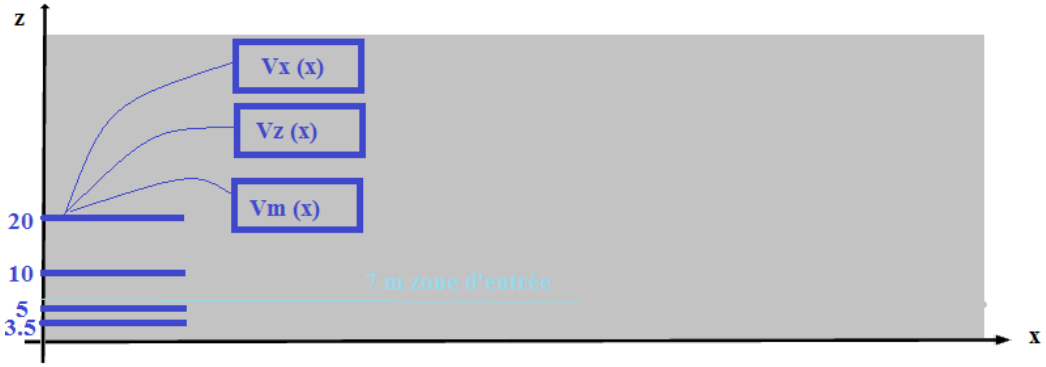


Figure 90 : lignes de traçage horizontales

Distribution globale de la composante horizontale de la vitesse

Figure 91 : distribution globale de la composante horizontale

La distribution de la composante horizontale de la vitesse est similaire à la distribution de la norme de vitesse dans le domaine. Car la composante horizontale apporte la plus grande contribution dans la vitesse.

Les projections la composante horizontale de la vitesse sur les différentes lignes verticales

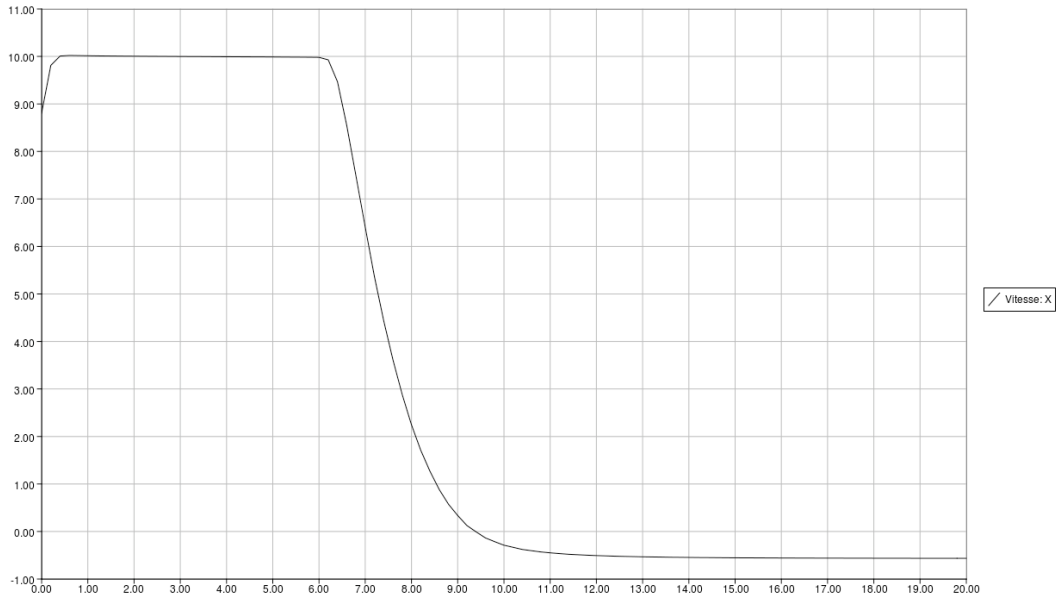


Figure 92 : Composante horizontale à 10 m du bâtiment

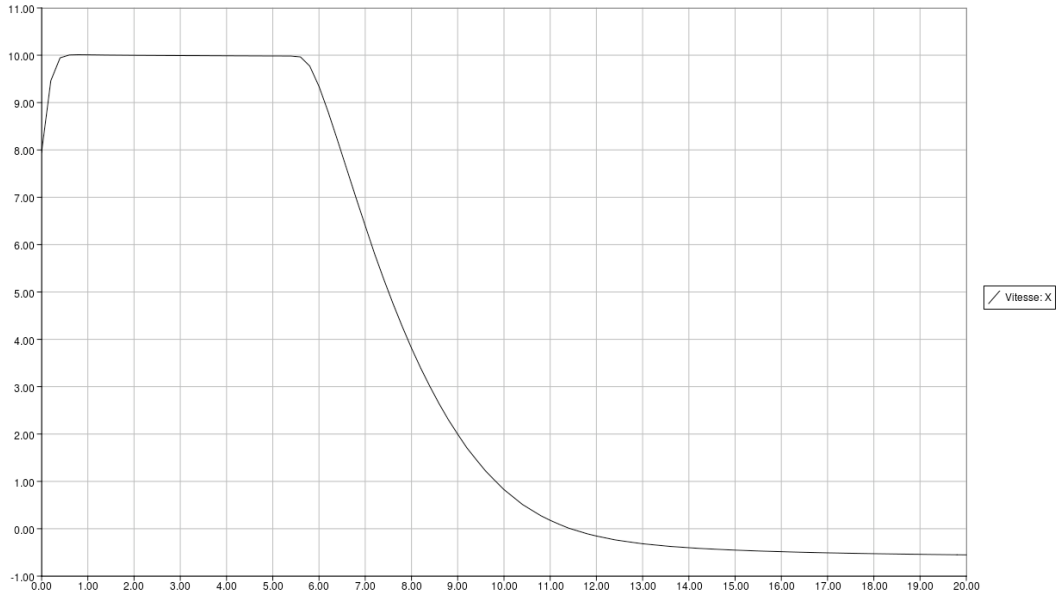


Figure 93 : Composante horizontale à 20 m du bâtiment

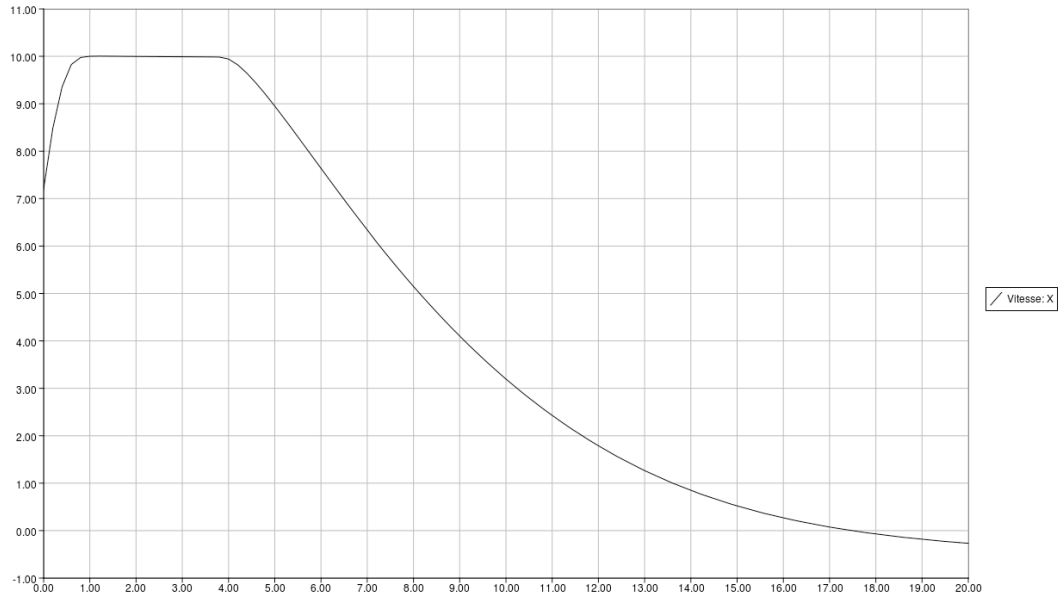


Figure 94 : Composante horizontale à 50 m du bâtiment

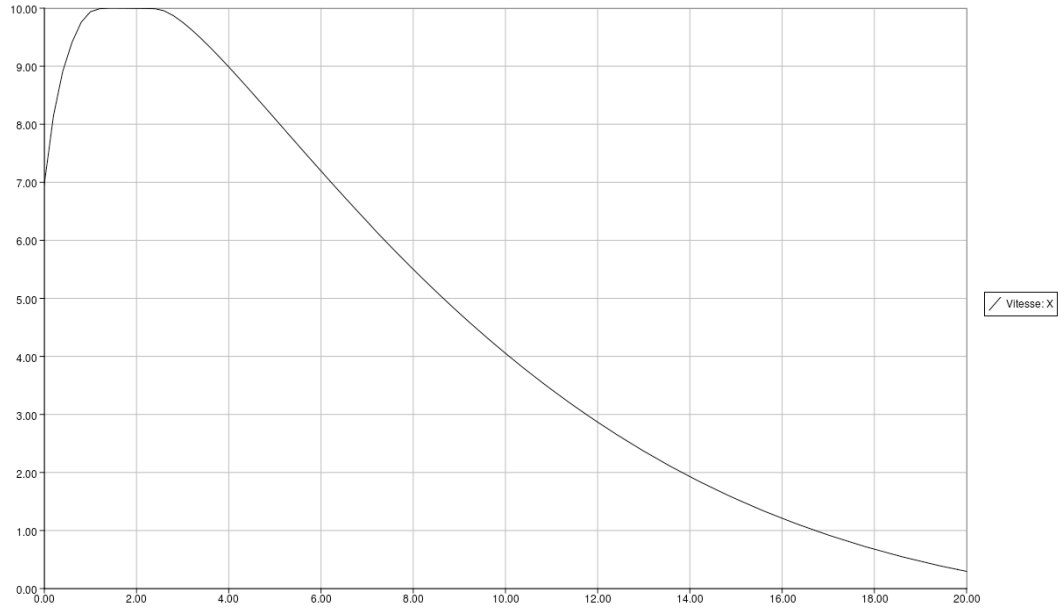


Figure 95 : Composante horizontale à 75 m du bâtiment

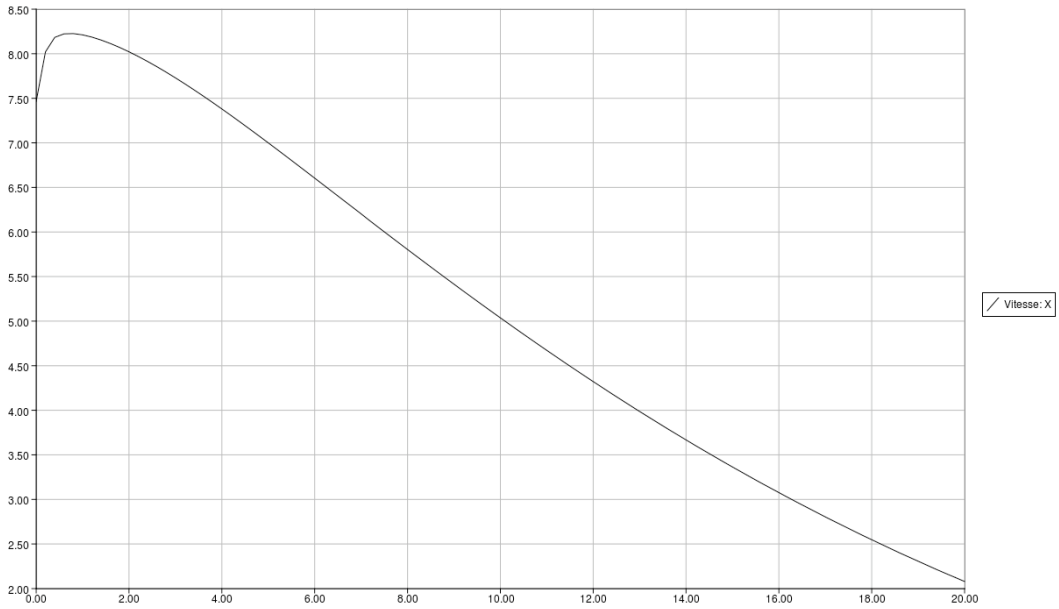


Figure 96 : Composante horizontale à 150 m du bâtiment

La valeur de la vitesse de ces profils est comprise entre 7 et 9 m/s au niveau du sol. La vitesse atteint une valeur maximale de 10 m/s sur toutes les verticales situés à une distance inférieure ou égale à 75 m du bâtiment. La vitesse maximale décroit jusqu'à atteindre 8,25 m/s à une distance de 150 m du bâtiment. La vitesse maximale est maintenue constante dans des zones de hauteurs variantes entre 5 et 0 m suivant la position par rapport au bâtiment. Après cette zone ou la valeur maximale est maintenue constante, la composante horizontale de la vitesse décroit jusqu'à atteindre une valeur nulle à une hauteur de 9.3 m à 10 m du bâtiment, et à plus de 20 m de hauteur à des distances supérieures à 75 m du bâtiment.

Distance du bâtiment	V_x au sol ; m/s	V_x max m/s	V_x max atteint à la hauteur	V_x max maintenu constant jusqu'à la hauteur	La vitesse s'annule à une hauteur
10 m	9	10	0.8	6.2	9.3
20 m	8.2	10	0.5	5.5	11.5
50 m	7.3	10	0.8	3.9	17.5
75 m	7	10	1	1.5	Plus que 20
150 m	7.5	8.5	0.8	0.8	Plus que 20

Tableau 18 : Composante horizontale de vitesse en fonction de la hauteur

Les différents profils rendent compte de la chute de vitesse au niveau du sol et du cône d'établissement du jet.

Les projections la composante horizontale de la vitesse sur les différentes lignes horizontales

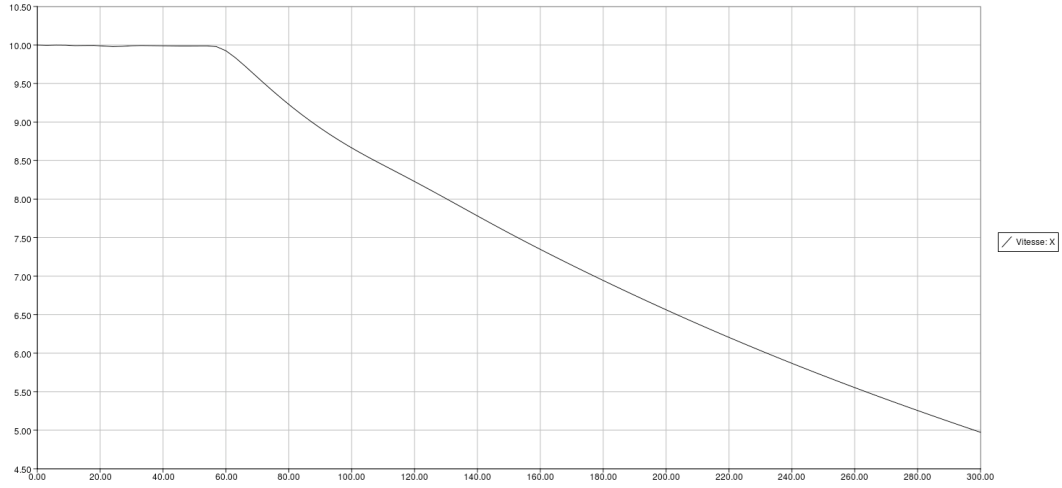


Figure 97 : Composante horizontale à 3.5 m du sol

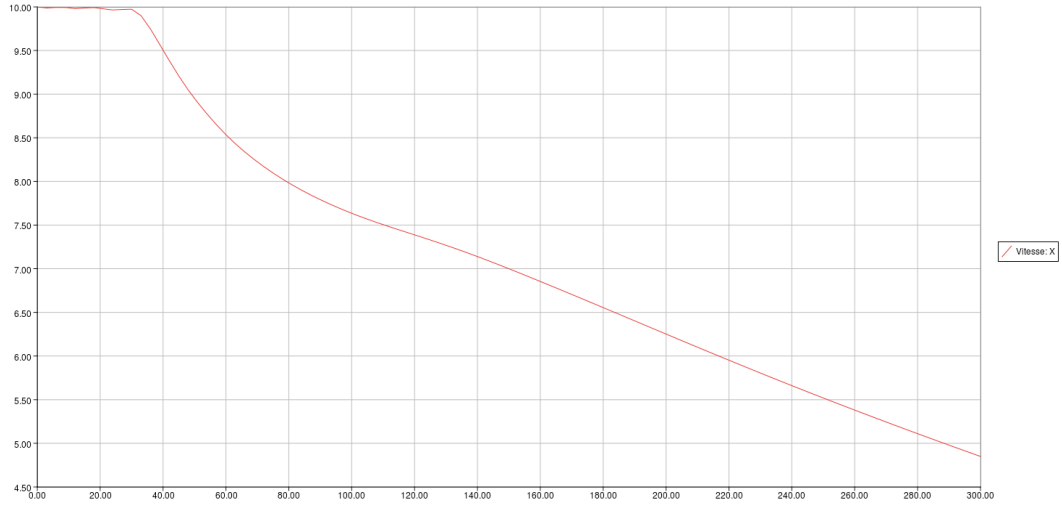


Figure 98 : Composante horizontale à 5 m du sol

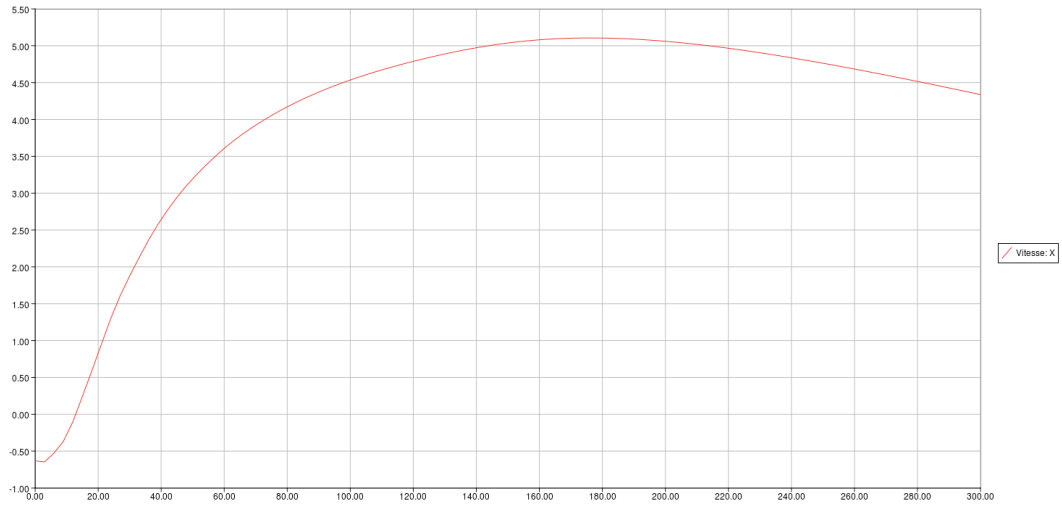


Figure 99 : Composante horizontale à 10 m du sol

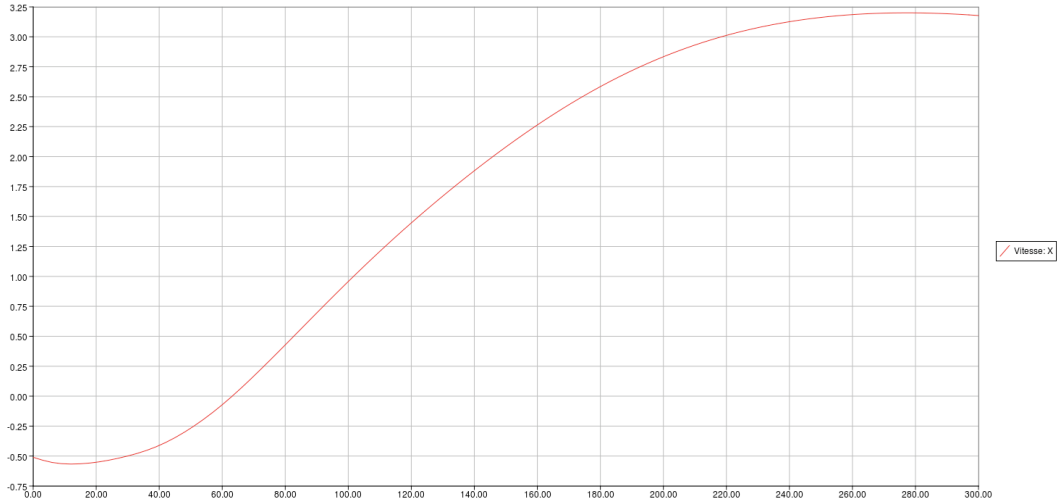


Figure 100 : Composante horizontale à 20 m du sol

Ces profils de la composante horizontale de la vitesse peuvent être divisés en deux catégories: la première contenant les profils tracés sur des horizontales dans la zone d'injection du flux (entre 3,5 et 5 m de haut) et la seconde contenant les profils des vitesses tracés sur des horizontales hors la zone d'entrée (entre à 10 m et 20 m de haut).

Les profils dans la zone d'injection :

Les profils obtenus à des hauteurs de 3.5 et 5 m représentent l'évolution de la vitesse dans l'axe du jet. Nous pouvons remarquer que la vitesse d'injection est maintenue constante sur certaines distances par rapport à l'entrée. Ces graphiques permettent de mieux quantifier la taille du cône d'établissement.

Hauteur m	V_{max} maintenue jusqu'à une distance du bâtiment ; m	V_{min} m/s
3.5	55 m	5
5	35 m	4.6

Tableau 19 : Composantes horizontales de la vitesse en fonction de la distance au bâtiment

La valeur minimale de cette composante dans le domaine de traçage est obtenue à une distance de 300 m du bâtiment, qui est le point d'analyse le plus éloigné pris en compte. La taille de la zone d'établissement de la vitesse maximale décroit en s'éloignant verticalement du sol. Les variations de la vitesse deviennent de plus en plus fortes en s'éloignant verticalement du sol. La composante horizontale de la vitesse décroit en s'éloignant du sol

Les profils au-dessus de la zone d'entrée.

Les vitesses commencent à être négatives au début. Une fois que les vitesses deviennent positivent elles croissent et atteignent leurs valeurs maximales loin du bâtiment, puis elles décroisent lentement.

Hauteur Au dessus du sol	Vitesse positive à partir d'une distance du bâtiment	$V_x(x)$ max	$V_x(x)$ max atteint à une distance	Vitesse à une distance de 300 m
10 m	15	5.2	170	4.3
20 m	65	3.2	280	3.1

Tableau 20 : Composante horizontale de la vitesse en fonction de la distance au bâtiment

Au-dessus de la zone d'entrée, nous avons imposé un mur comme condition à la limite. Ainsi, tout mouvement dans cette zone est causé par l'influence de la vitesse d'entrée. Le mouvement dans cette zone sera influencé par la présence du mur, et va commencer par un flux reversé (Back ward flow), ce qui explique la présence des vitesses négatives au début. L'effet de la vitesse d'entrée décroit en s'éloignant de la zone d'entrée, ce qui est complètement logique.

La distribution globale de la composante verticale de la vitesse

Figure 101 : Distribution globale de la composante verticale de la vitesse

Nous pouvons voir dans la composante verticale de la vitesse du jet qu'il entre dans le domaine sous forme de cône centré sur l'entrée (en rouge brique). Il y a un flux de revers (back ward flow) qui est causé par la présence du mur. L'air déjà présent dans le domaine s'échappe pour donner place au flux injecté. Ceci est exprimé par la présence de vitesses négatives (en bleu). Ce profil n'est pas complètement conforme aux observations sur les sites de démolition. Cette composante de vitesse est beaucoup plus faible que la composante horizontale.

Les projections la composante verticale de la vitesse sur les différentes lignes verticales

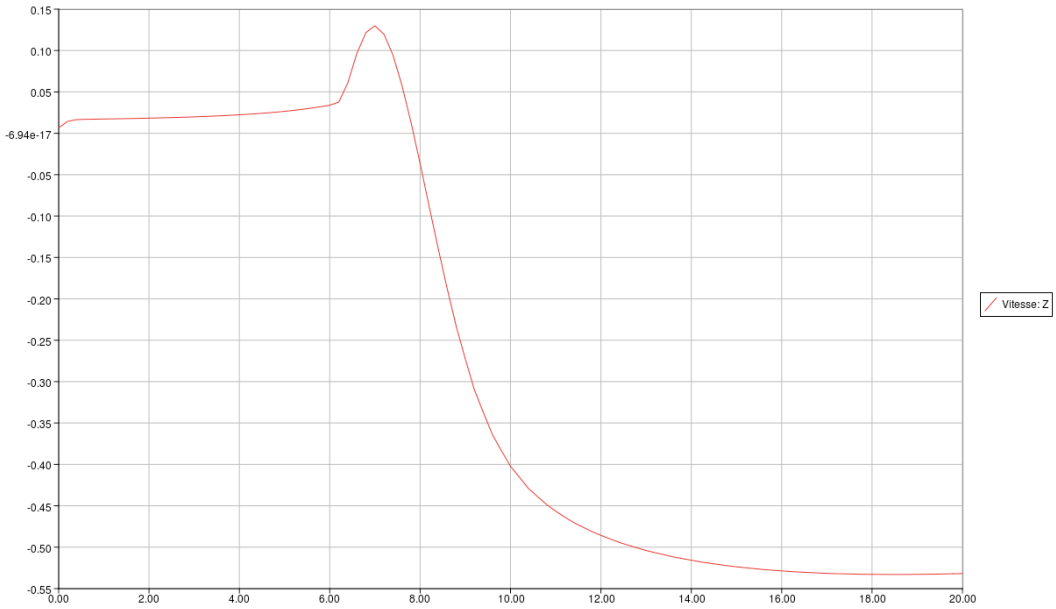


Figure 102 : Composante verticale à 10 m du bâtiment

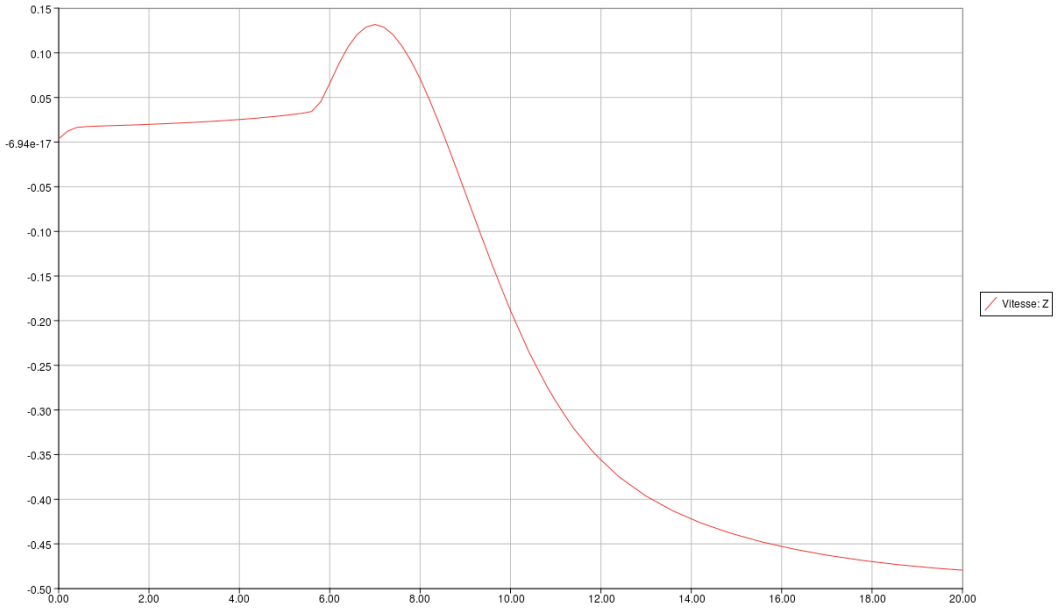


Figure 103 : Composante verticale à 20 m du bâtiment

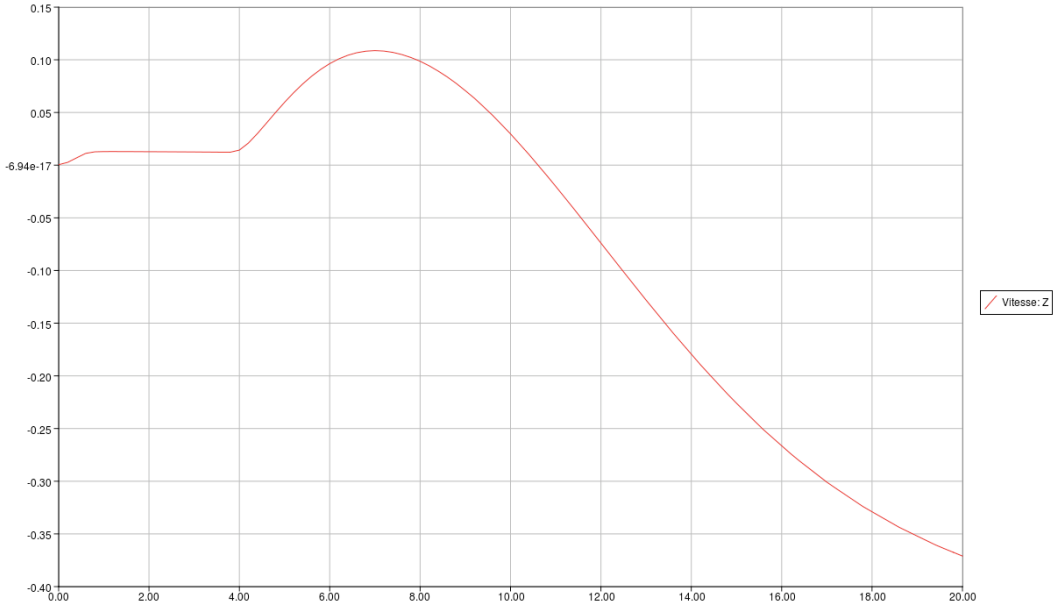


Figure 104 : Composante verticale à 50 m du bâtiment

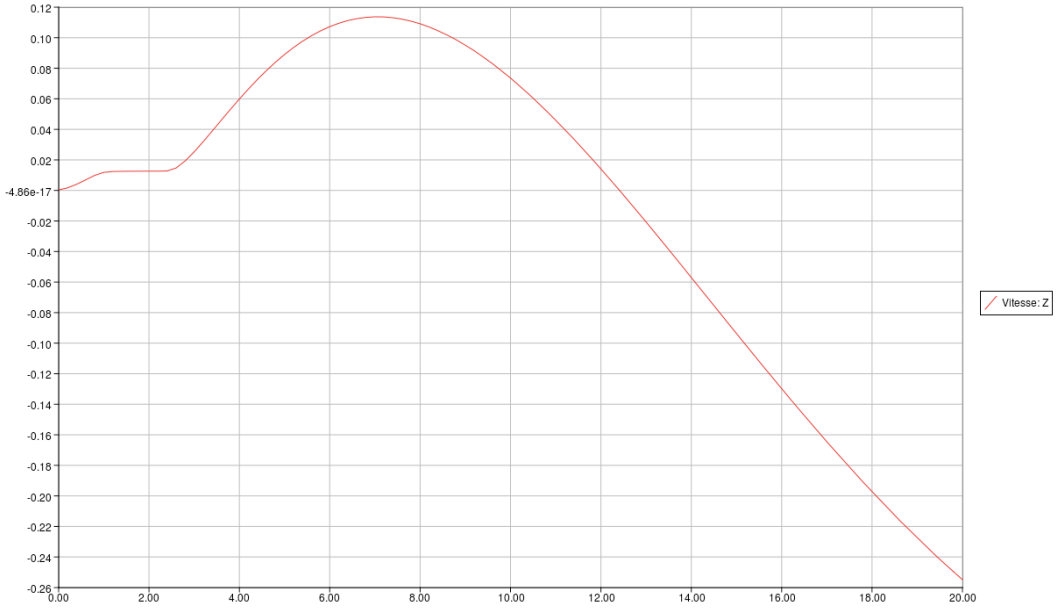


Figure 105 : Composante verticale à 75 m du bâtiment

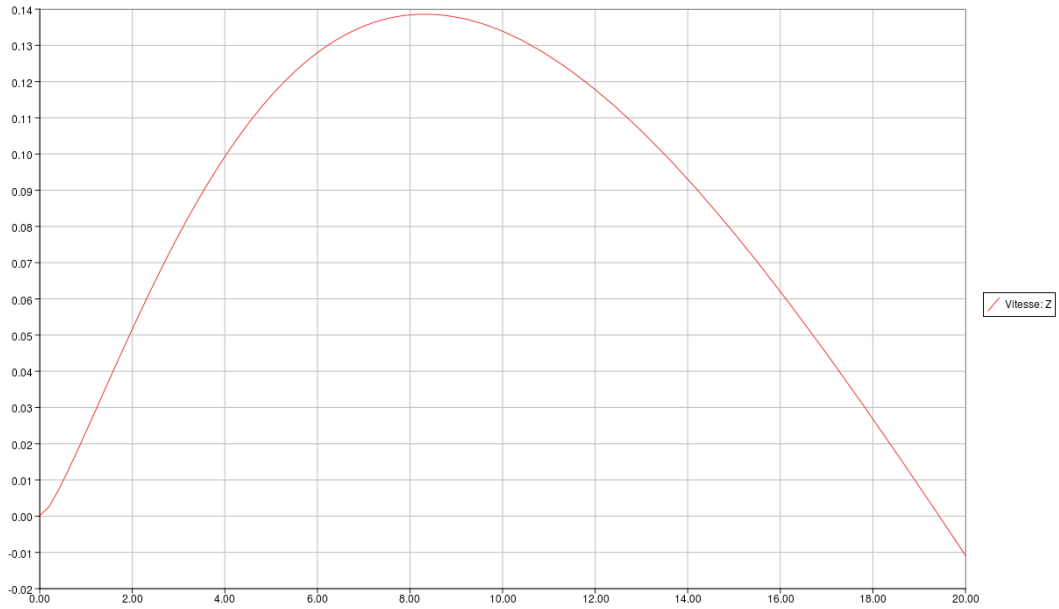


Figure 106 : Composante verticale à 150 m du bâtiment.

Tous les profils, sauf le dernier, présentent tous les mêmes propriétés : une vitesse pratiquement nulle au niveau du sol, une vitesse positive et constante, puis une augmentation de la vitesse de manière parabolique et finalement une inversion de la vitesse. Ces caractéristiques sont en accord avec les propriétés des jets, en effet la composante de la vitesse suivant z doit être nulle à la paroi, positive dans le jet, en raison de l'accroissement de sa dimension, puis doit être négative, car l'air alentour sera entrainé par le jet.

Les projections la composante verticale de la vitesse sur les différentes lignes horizontales

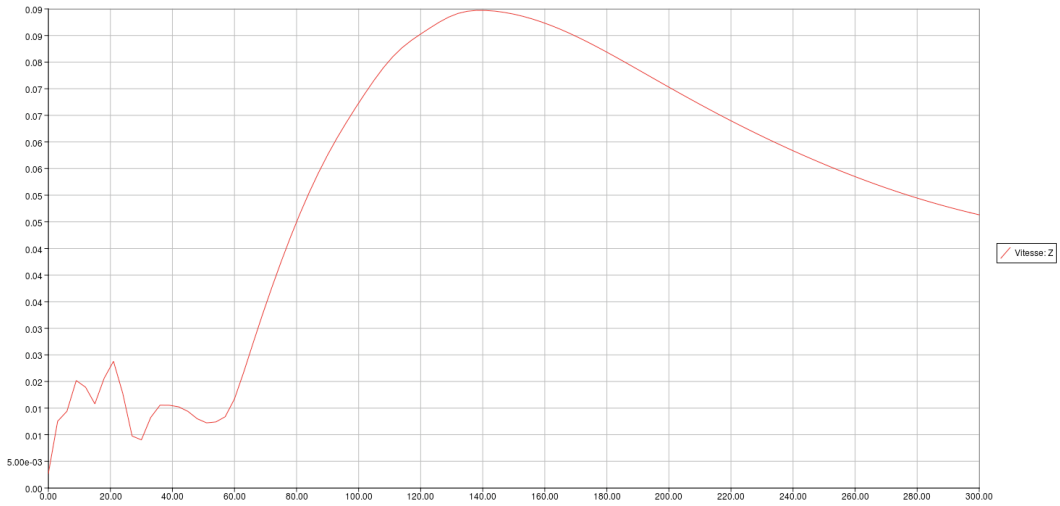


Figure 107 : Composante verticale à 3.5 m du sol

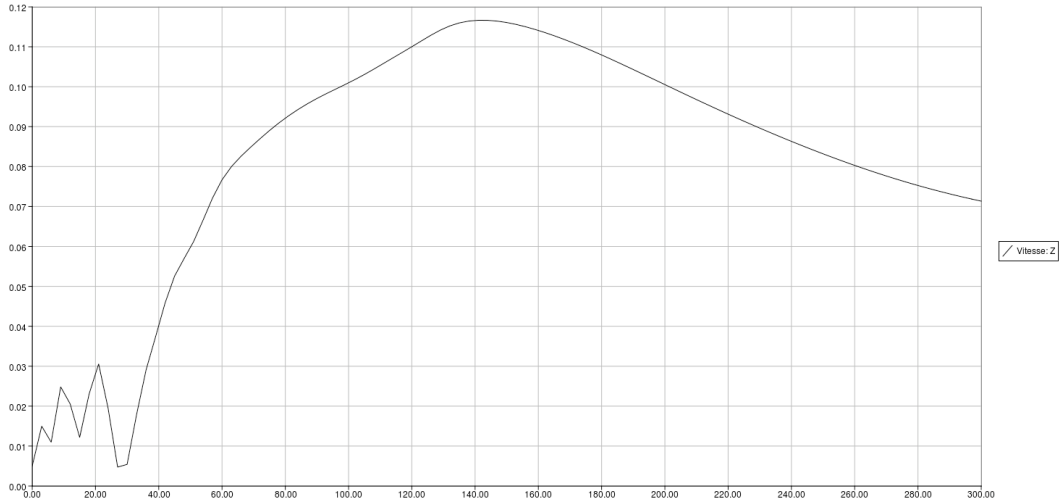


Figure 108 : Composante verticale à 5 m du sol

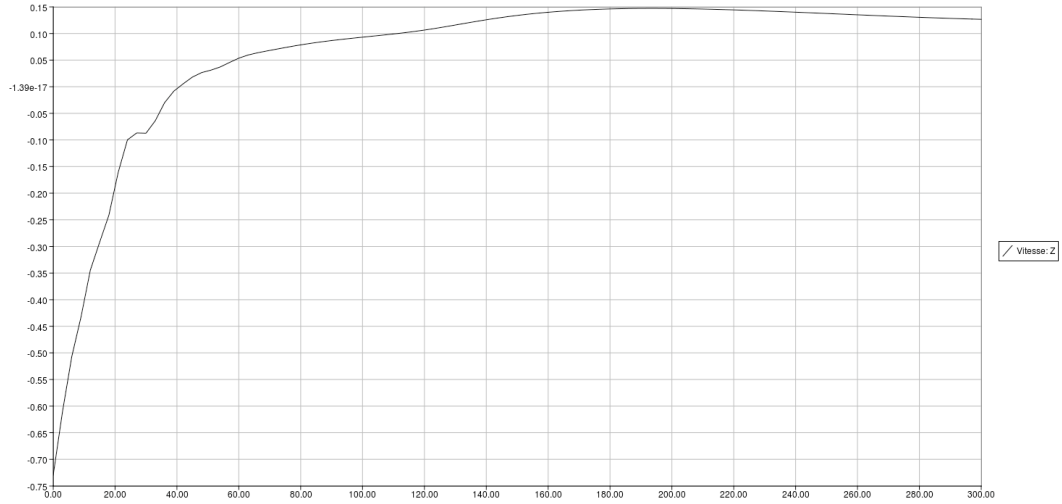


Figure 109 : Composante verticale à 10 m du sol

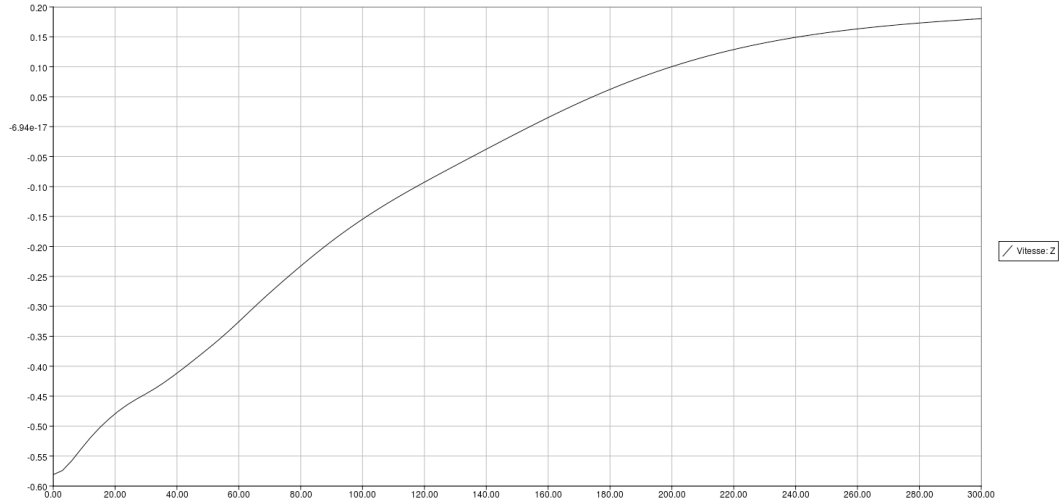


Figure 110 : Composante verticale à 20 m du sol

Comme pour la composante horizontale de la vitesse, les profils de la composante verticale de la vitesse peuvent être divisés en deux catégories : à l'intérieur de la zone d'injection et au-dessus de la zone d'injection.

Les profils de la composante verticale de la vitesse dans la zone d'entrée :

Les profils représentent un comportement non uniforme puis ils deviennent croissants. Après que la valeur maximale ait été atteinte, la vitesse décroît.

Hauteur (m)	Comportement non uniforme jusqu'à une distance du bâtiment	La vitesse à ce point est de (m/s)	La vitesse atteint sa valeur maximale à la distance de	vitesse maximale (m/s)	Vitesse à 300 m du bâtiment (m/s)
3.5	50	0.01	140 m	0.9	0.052
5	30	0.05	140 m	0.116	0 .071

Tableau 21 : Composante verticale de la vitesse en fonction de la distance au bâtiment

La zone de comportement non uniforme décroit en s'éloignant du sol. La vitesse maximale est atteinte dans les deux profils à 140 m du bâtiment. La vitesse maximale décroit en s'éloignant du sol. Le comportement non uniforme dans les premières parties des graphiques est dû au fait que la vitesse d'injection n'est pas la seule quantité qui gouverne le flux dans cette région. Il y a d'autres paramètres qui entrent en jeu.

Les profils de la composante verticale de la vitesse au dessus de la zone d'entrée :

- Ces profils sont croissants avec une vitesse maximale de 0.17 dans le domaine de calcul.
- La croissance devient moins rapide en s'éloignant du sol

3.1.5 Conclusions sur le jet stationnaire

- Le jet stationnaire a pu reproduire le début du phénomène.
- Le retour du jet vers le bâtiment n'est pas clairement détectable par ce jet. On remarque une partie des composantes rentrantes de la vitesse prise en fonction de la verticale, mais pas pour la vitesse tout entière.
- La composante verticale de la vitesse prise comme fonction de la verticale, montre de retour vers le bâtiment d'une façon claire, mais la forme du nuage formé par le flux entrant n'est pas détectée.
- De plus, ce modèle n'est pas capable de montrer l'évaluation du phénomène au cours du temps.

Une simulation a été conduite avec les mêmes hypothèses, mais cette fois-ci en admettant le caractère instationnaire de l'écoulement et en conservant une entrée de vitesse constante. Le profil global est très similaire et les conclusions sont les

mêmes. Il semble donc que le décollement de la couche limite ne puisse être approché que par un écoulement où la vitesse varie au cours du temps.

3.2 Cas d'un jet à injection instationnaire

Les simulations sur le jet instationnaire ont été faites sur un domaine plus petit que celui du jet stationnaire. Les résultats des profils de vitesse obtenus ainsi que les observations sur site et les études théoriques ont servi pour définir le profil de vitesse d'entrée. On introduit un flux de scalaire passif uniforme et constant de 1 kg/s pour visualiser ce qui se passe derrière le flux principal représentant la poussière injectée dans le domaine. Ce scalaire passif correspond à un traceur de concentration. Les étapes de calculs pour cette simulation ne seront pas montrées en détail.

3.2.1 La géométrie

Forme

La géométrie consiste un parallélépipède rectangle partitionné par un plan situé à une hauteur de 10 m. Ce plan de partition va servir à définir la zone d'entrée. La hauteur de 10 m correspond à la hauteur du tas de gravats restant après une démolition et la hauteur d'injection approximative. Dans cette région le mouvement des particules est trop fort, il est donc raisonnable de prendre cette hauteur pour la zone d'entrée pour mettre en évidence cette zone de très fort changement dans le mouvement du flux.

Dimensions

Les propriétés de la géométrie sont montrées dans le tableau ci-dessous :

Hauteur	50 m
Largeur	100 m
Profondeur	1 m
Plan de partition à la hauteur	10 m

Tableau 22 : Dimensions, cas instationnaire

Les groupes de faces ont les propriétés cartésiennes suivantes :

Groupe	Intervalles des coordonnées dans l'ordre : x,y,z
Entrée	[0,0] x [0,1] x [0,10]
Sortie	[100,100] x [0,1] x [0,50] et [0,100] x [0,1] x [50,50]
Sol	[0,100] x [0,1] x [0,0]
Mur	[0,0] x [0,1] x [10,50]
Symétrie	[0,100] x [0,0] x [0,50] et [0,100] x [1,1] x [0,50]

Tableau 23 : Groupes de faces, cas instationnaire

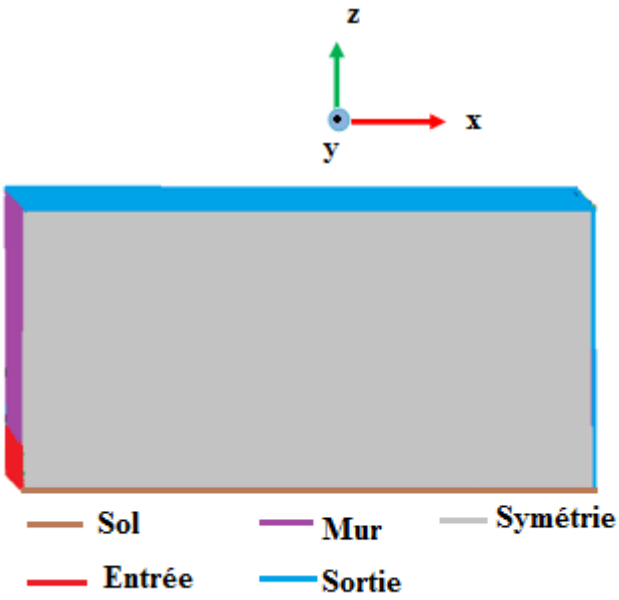


Figure 111 : regroupement des faces, instationnaire

3.2.2 La discrétisation

Discrétisation des segments

Les détailles de la discrétisation des segments sont donné dans le tableau suivant :

Segment	Méthode	Hypothèse	Commentaires
[x=0, 0<y<1, z=0] [x=0, 0<y<1, z=50] [x=100, 0<y<1, z=0] [x=100, 0<y<1, z=50]	Nombre de segments	Distribution équidistante de 1 segment	La discrétisation suivant la profondeur en 1 segment et pour le passage en 3 D
[0<x<100, y=0, z=0] [0<x<100, y=0, z=50] [0<x<100, y=1, z=0] [0<x<100, y=1, z=50]	Distribution arithmétique	Longueur entre 0.25 et 1	Ce sont les segments dans le sans de l'écoulement
[x=0, y=0,0 <z<10] [x=100, y=0,0 <z<10] [x=0, y=1,0 <z<10] [x=100, y=1,0 <z<10]	Distribution arithmétique	Longueur entre 0.25 et 1	Les segments verticaux : zone d'entrée
[x=0, y=0,10 <z<50] [x=100, y=0,10 <z<50] [x=0, y=1,10 <z<50] [x=100, y=1,10 <z<50]	Nombre de segments	Distribution équidistante de 40 segments	Autres segments verticaux

Tableau 24 : Discrétisation, cas instationnaire

Les segments verticaux sont divisés en deux groupes : ceux qui correspondent à la zone d'entrée où la discrétisation est plus fine, et les autres segments verticaux. Cette discrétisation se traduit par un maillage plus fin dans la zone d'entrée.

Maillage

On utilise des mailles rectangulaires en deux dimensions et cubiques en 3 dimensions. Les détails du maillage sont montrés et le résultat est montré dans les figures ci-dessous.

Figure 112 : détailles du maillage, instationnaire

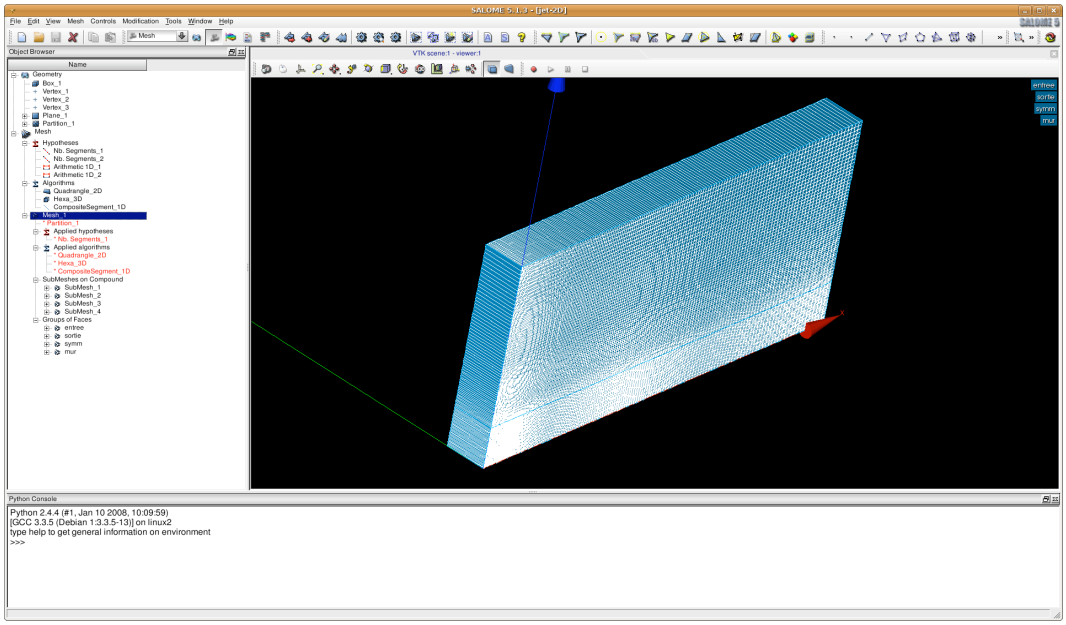


Figure 113 : maillage, instationnaire

3.2.3 Module de calcul

Paramètres principaux

Les paramètres de calcul sont considérés comme identiques à ceux du cas stationnaire. Les différences sont explicitées. Les conditions aux limites seront étudiées à nouveau pour ce cas. Les paramètres principaux qui changent dans le cas non stationnaire et par introduction du flux passif sont :

- Type d'écoulement : non-stationnaire
    - Pas de temps : uniforme et constant
- Scalaires supplémentaires : scalaire passif
- Suivit du calcul :
    - Nombre d'itération par pas de temps
    - Pas de temps de référence
- Contrôle des sorties : il faut préciser le nombre de pas de temps entre chaque sortie du listing et du post traitement.

Conditions aux limites

Les conditions aux limites du domaine sont les suivantes :

Groupe	Condition
Entrée	entrée
Sortie	sortie
Sol	paroi
Mur	paroi
Symétrie	symétrie

Tableau 25 : Conditions aux limites, cas instationnaire

Variables dynamiques, vitesse d'injection

- Scalaire: flux de scalaire passif de 1 kg/s
- La vitesse a les composantes suivant y et z nulles. La composante Vx suivant l'axe des x de la vitesse d'entrée est une fonction définie par l'utilisateur.

Le profil de vitesse

Le profil de vitesse imposé est le suivant, il correspond au premier cas exposé plus haut :

pour 0<t<3, V = (20/3)*t; pour 3<t<3,5, V = 20-40*(t-3); pour t>3,5 V = 0

Pour mettre en œuvre ce profil, il faut le coder la routine usclim qui gère les conditions aux limites. Sa formulation est la suivante :

```
C=============================================
=============
C 2. REMPLISSAGE DU TABLEAU DES CONDITIONS LIMITES
C       ON BOUCLE SUR LES FACES DE BORD
C         ON DETERMINE LA FAMILLE ET SES PROPRIETES
C           ON IMPOSE LA CONDITION LIMITE
C
C           IMPOSER ICI LES CONDITIONS LIMITES SUR LES FACES DE
BORD
C
C=========================================
C
C Entree variable en vitesse pour la composante Vx sur la face entrée
C
      CALL GETFBR('entree',NLELT,LSTELT)
C     ===========
C
      IF (TTCABS.LE.3D0) THEN
        DO IELT = 1, NLELT
          IFAC = LSTELT(IELT)
          ITYPFB(IFAC,IU)=20
          ICODCL(IFAC,IU)=1
          RCODCL(IFAC,IU,1) = (20.D0)*TTCABS/(3D0)
        ENDDO
C
      ELSE IF (3D0.LT.TTCABS.AND.TTCABS.LE.3.5D0)THEN
        DO IELT = 1, NLELT
          IFAC = LSTELT(IELT)
          ITYPFB(IFAC,IU)=20
          ICODCL(IFAC,IU)=1
          RCODCL(IFAC,IU,1) = (20.D0)-40.D0*(TTCABS-3D0)
        ENDDO
C
      ELSE IF (TTCABS.GT.3.5D0) THEN
        DO IELT = 1, NLELT
          IFAC = LSTELT(IELT)
          ITYPFB(IFAC,IU)=20
          ICODCL(IFAC,IU)=1
          RCODCL(IFAC,IU,1) = 0D0
        ENDDO
      ENDIF
```

Dans chaque cas étudié, le code crée automatiquement un répertoire FORT/USER dans laquelle il ya le format général de toutes les routines

utilisateur. Une fois une routine est modifiée, elle doit être copiée de ce répertoire et mise sous le répertoire FORT

Commentaires

- Identification des faces de bord concerné se fait à l'aide de la commande GETFBR : c'est la face nommée « entrée ». Cette commande renvoie NLTELT le nombre entier qui correspond au nombre de faces de bord trouvées dans la face caractérisée par le critère « entrée », et LSTELT le tableau d'entiers de taille NLTELT donnant la liste des faces de bord trouvées dans la face d'entrée.
- L'algorithme suivi est le suivant :
    - Appeler toutes les faces d'entrée
    - Définir les conditions à imposer sur la composante V_x (ou bien IU si haut) sur les faces IFAC aux temps TTCAPS :
    - Si les conditions sur le temps sont vérifiées faire
    - Pour i=1 jusqu'au nombre total des faces de la zone
    - Identifier la face numéro i : IFAC : xième composante de LSTELT
    - Identifier cette face comme étant une face d'entrée pour IU
    - Imposer une condition de Dirichlet pour IU sur la face IFAC
    - Définir la valeur de variable IU sur la face IFAC

3.2.4 Post traitement

Evolution de la vitesse au cours du temps

Le domaine au temps initial :

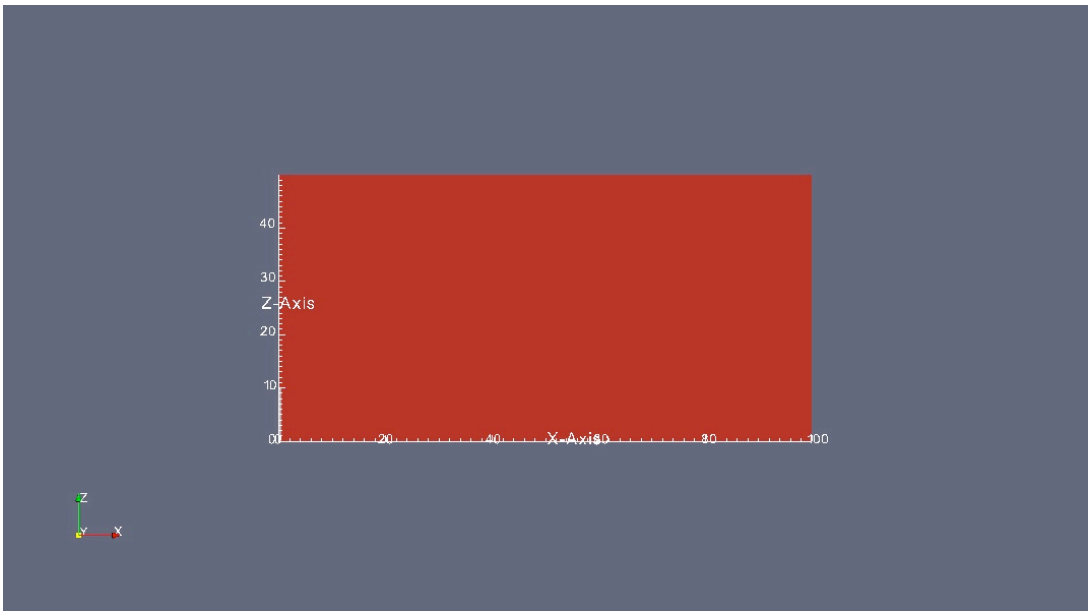


Figure 114 : Temps initial

Le début de l'injection :

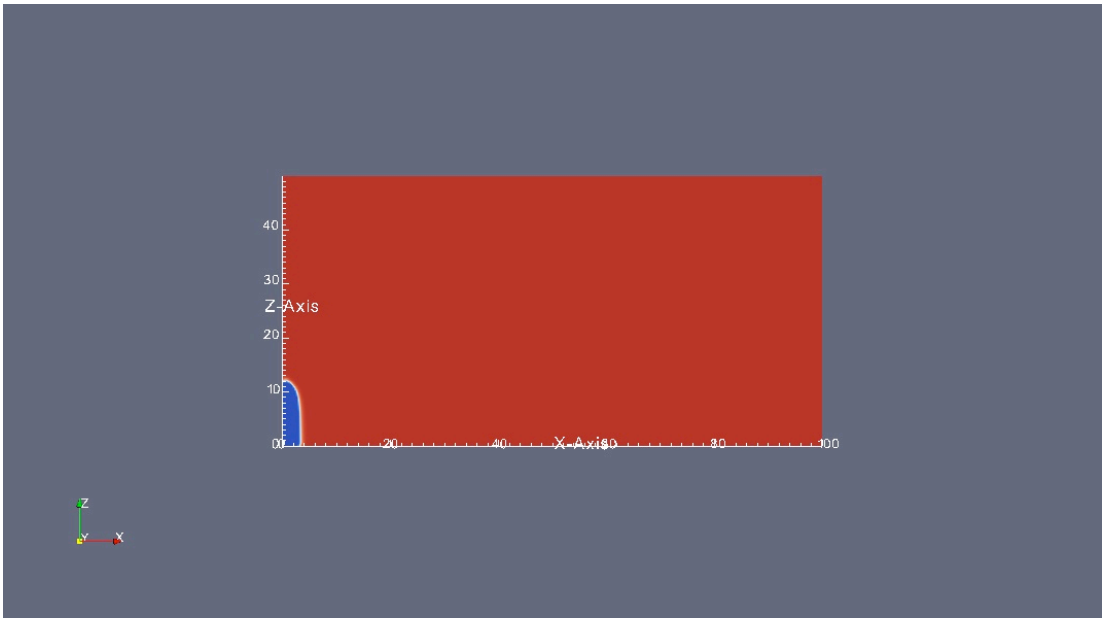


Figure 115 : début de l'injection 1

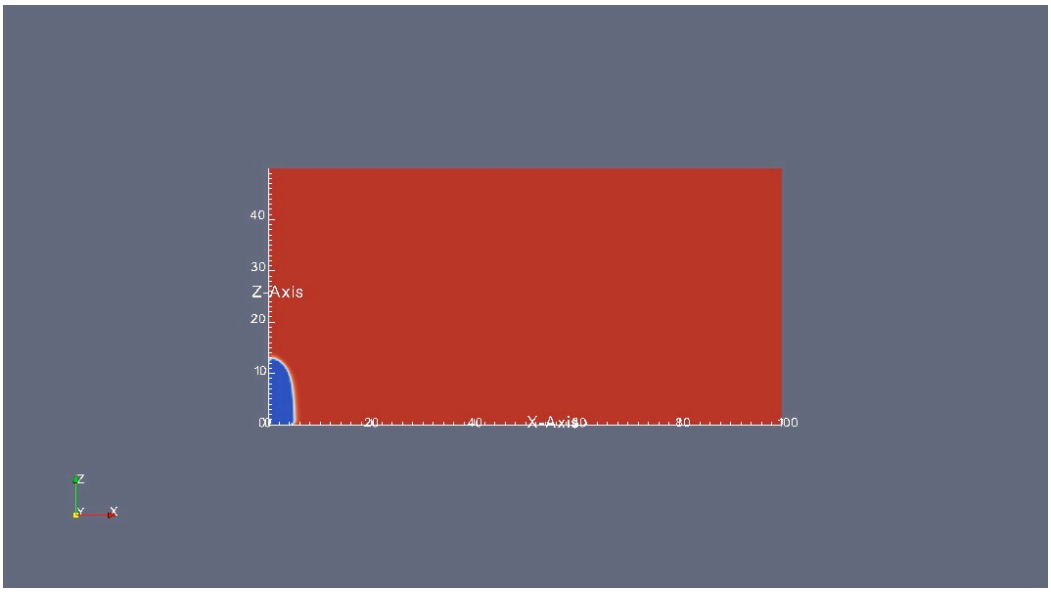


Figure 116 : début d'injection 2

Dans la figure :

- Horizontalement : formation d'une couche limite près de sol ;
- Verticalement : Le flux monte trop.

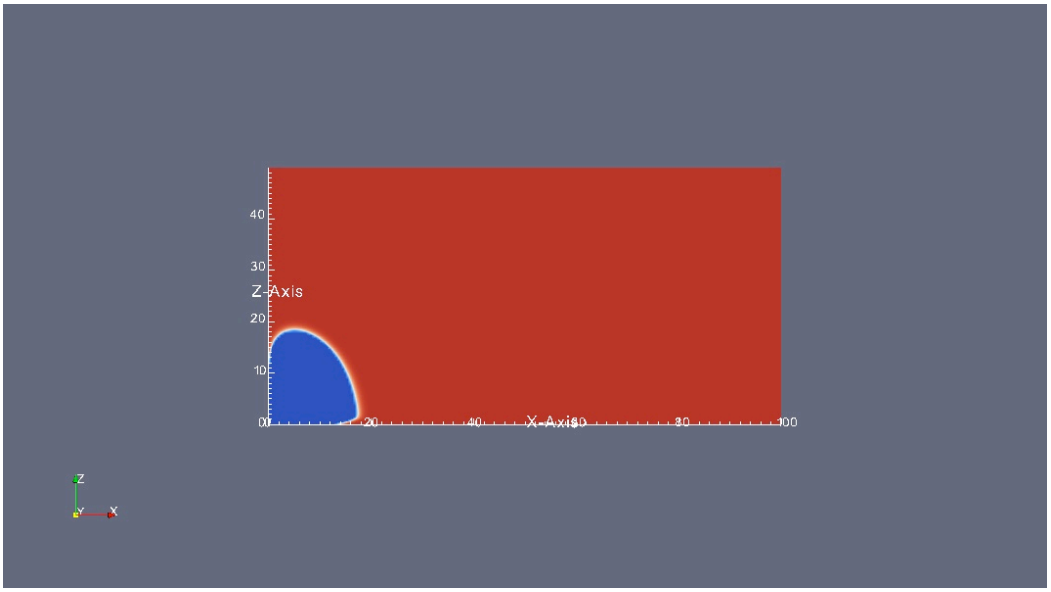


Figure 117 : Formation d'une couche limite

Commencement de la constance de la vitesse, la couche limite devient plus visible.

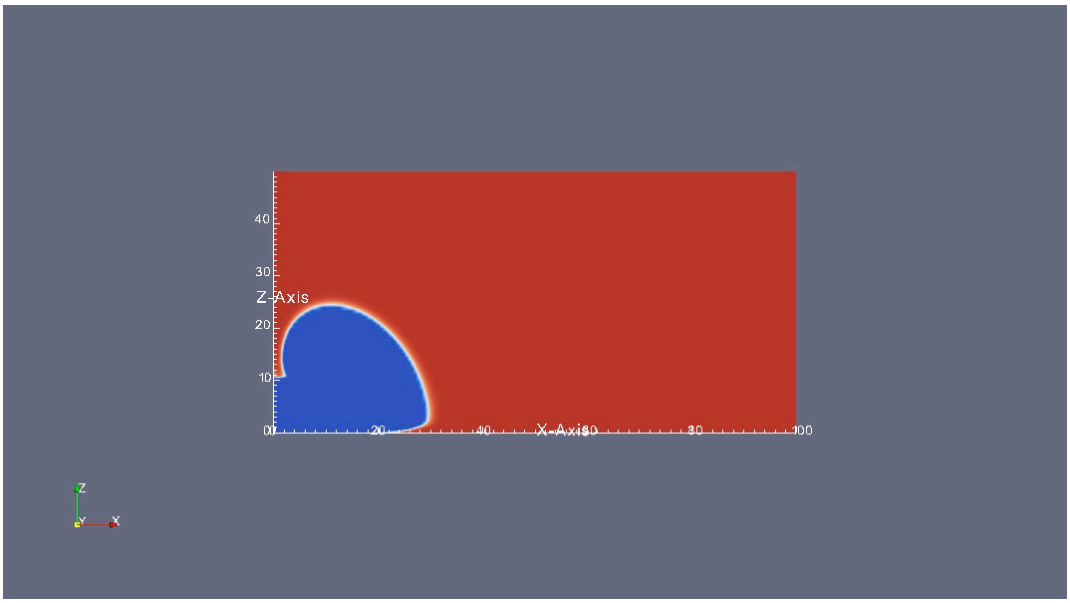


Figure 118 : Constance de la vitesse

Décroissance dans la vitesse. Le nuage continue d'avancer. Il n'y a plus de vitesse d'entrée, seul le scalaire passif continue à entrer.

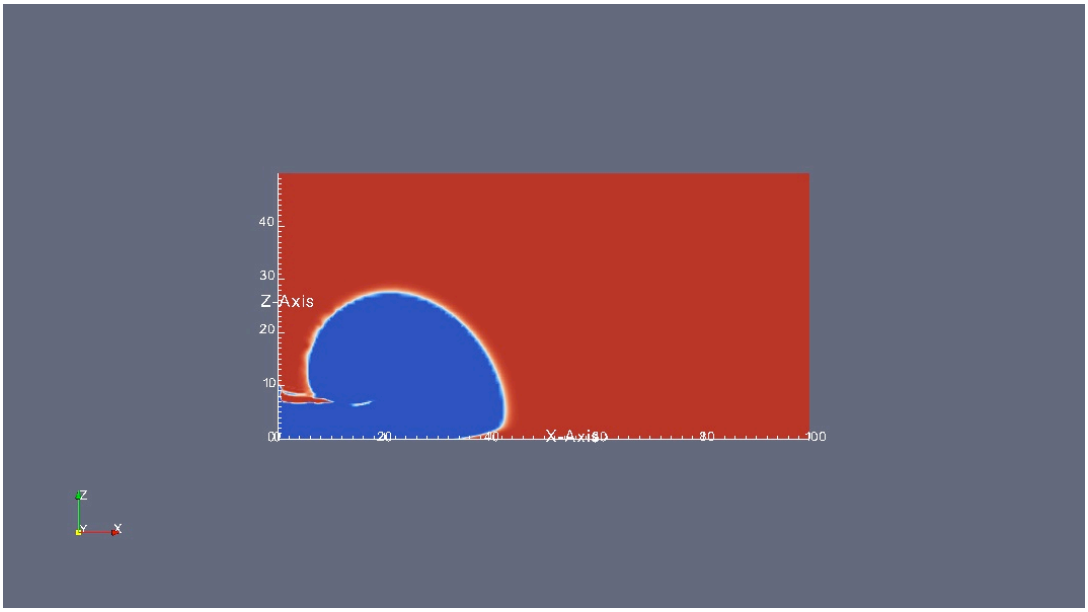


Figure 119 : avancement du nuage

Formation d'une grosse structure rotative retrouvée effectivement dans les cas de démolition.

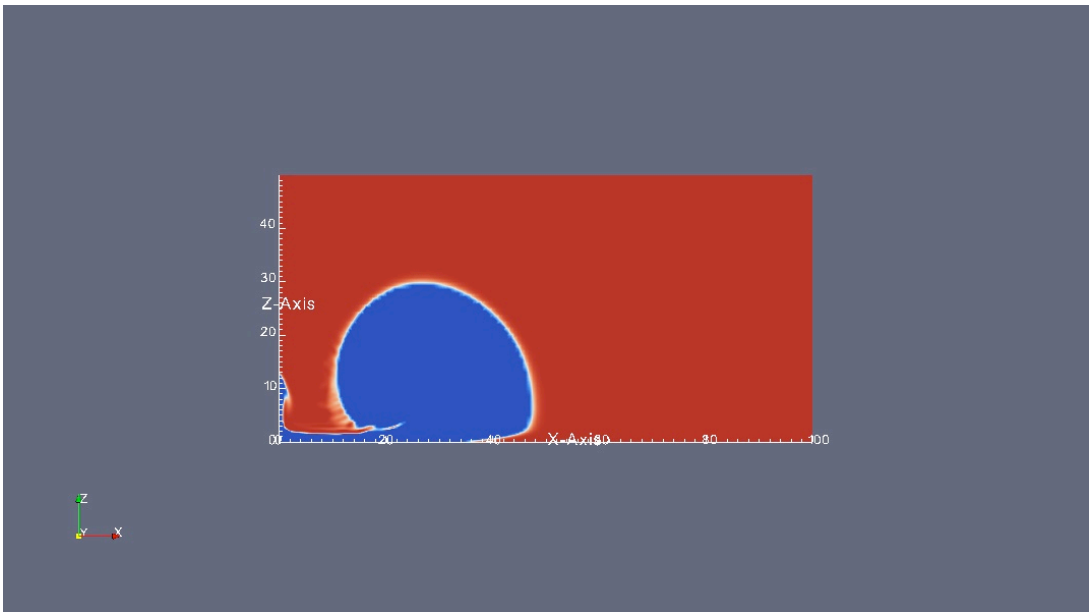


Figure 120 : Structure rotative

- Le flux arrive à 50 m du bâtiment. On remarque le décollement de la couche limite, ce qui est en accord avec les mesures sur site.
- La durée et l'intensité de la vitesse d'entrée sont conformes avec les mesures sur site.
- Le nuage a tendance à tirer l'air dans son sillage et remet par suite les particules en mouvement.

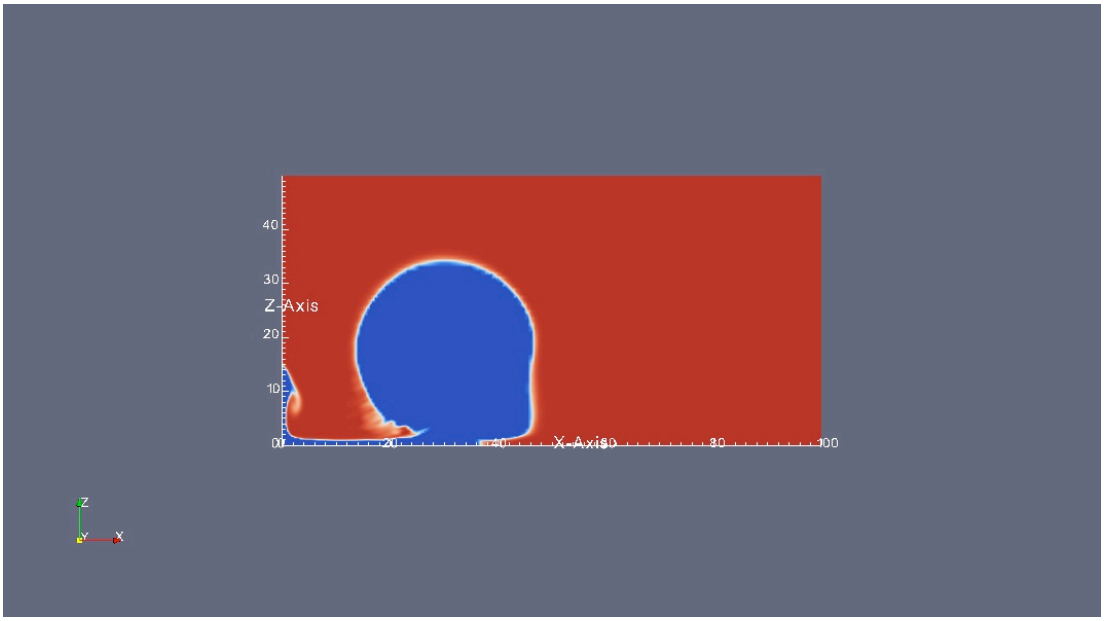


Figure 121 : le flux à 50 m

Le nuage a tendance à revenir vers sa source. Ceci semble être dû au mur au dessus de la face d'entrée et au profil de vitesse en entrée.

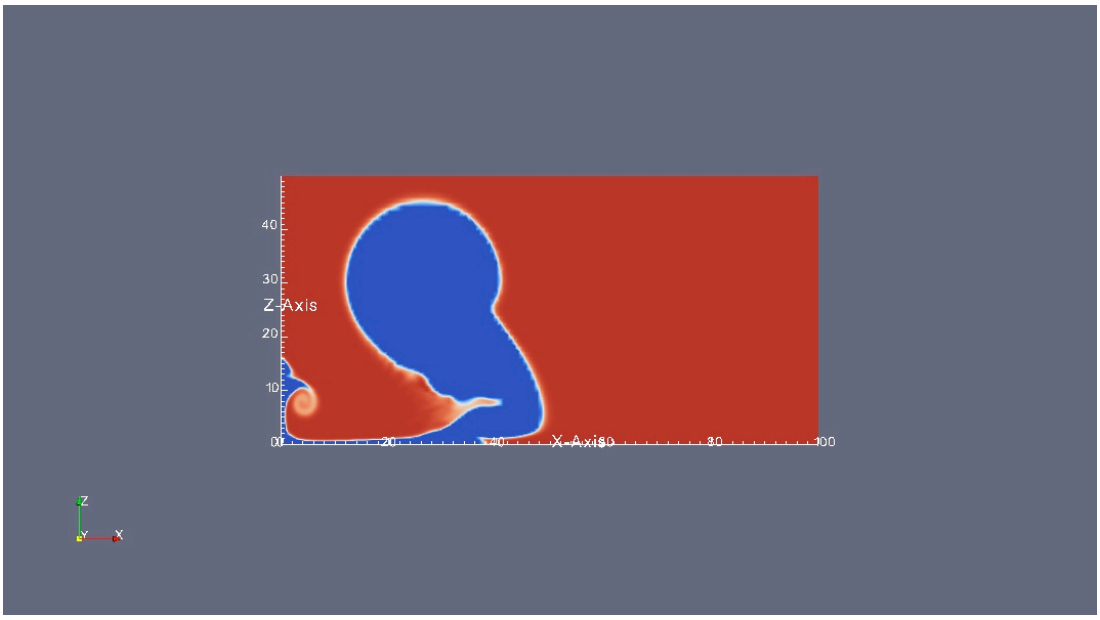


Figure 122 : effet du mur

3.2.5 Conclusions sur le jet instationnaire

- Le décollement de la couche limite se fait au bon endroit.
- La formation de structure rotative est aussi conforme aux mesures sur site. Mais les structures de ce modèle sont plus proches du bâtiment et plus hautes que les cas réels.
- Si à la place du mur nous avions une sortie libre, alors la répartition de la composante verticale de la vitesse de l'air déjà existant dans le domaine serait plus uniforme et nous n'aurions pas cette macro structure rotative.
- Le nuage atteint une hauteur de 40 m, en pratique il n'atteint pas plus de 30 m environ .
- Le nuage s'approche beaucoup du bord vertical supérieur. Pour cette raison il semble nécessaire d'augmenter la hauteur du domaine.

4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploité les données expérimentales dans le cadre d'une simulation numérique. Nous avons présenté :

- le code de calcul employé;
- la démarche employée;
- les résultats obtenus.

La description, du code de calcul, est axée autour d'une description globale du code pour différents niveaux d'utilisation, et d'une description des principaux sous-programmes permettant de résoudre le problème par une approche de type k-e.

Nous avons décrit la démarche de simulation employée en partant du domaine de résolution, de la condition d'entrée de vitesse et du plan de simulation employé.

Dans la première étape de la modélisation, nous avons considéré un domaine rectangulaire adjacent au bâtiment.

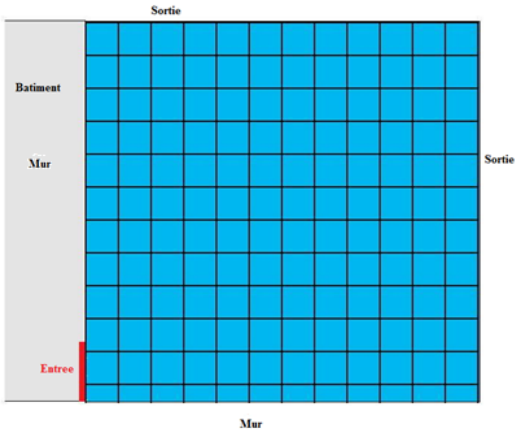


Figure 123 : Domaine de début

Nous avons fait une simulation stationnaire puis instationnaire du phénomène avec une injection de vitesse constante de 10 m/s. Ces simulations ont abouti à des résultats, acceptables pour le début de l'injection du flux pour le début de la démolition, mais non acceptables pour le reste de l'écoulement. La simulation stationnaire est par nature incapable de montrer le développement du jet au cours du temps. La simulation instationnaire présente le défaut d'avoir une vitesse constante d'injection; ce qui ne permet pas de décrire le reste du phénomène.

Dans un second temps, nous avons considéré un domaine de la même forme, mais avec des dimensions différentes afin de réduire le cout de calcul, tout en gardant les mêmes propriétés des faces à la frontière. Nous avons introduit un profil de vitesse de composantes nulles suivant la hauteur et la profondeur et de

composante variable au cours du temps suivant la largeur. Nous avons introduit aussi un scalaire passif pour visualiser simplement la forme globale du nuage.

La simulation instationnaire a abouti à un décollage de la couche limite au bon endroit et à la formation de flux rotatifs bien observés dans les démolitions. La distance du bâtiment à ces flux est plus petite que la distance réelle et leur hauteur est plus grande. Ceci est probablement dû à la présence du mur au dessus de la face d'entrée.

Au vu des différents résultats obtenus, il apparait qu'un certain nombre de modifications est nécessaire. Idéalement, il nous faudrait un bâtiment en mouvement dans notre domaine de calcul afin de créer le mouvement du fluide au sommet. Mais dans un premier temps, nous allons tester d'autres configurations.

Nous proposons d'étudier un domaine similaire, mais dans la condition de mur qui représente le bâtiment soit moins haut, comme décrit sur le schéma suivant.

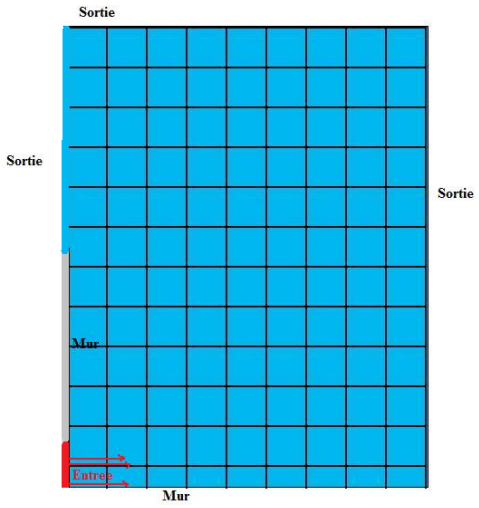


Figure 124 : Domaine révisé

Afin d'affiner la modélisation, nous proposons les pistes suivantes au niveau des conditions aux limites ainsi qu'au niveau des dimensions des zones frontière :

- La hauteur de l'entrée peut être reliée à la hauteur du tas de gravats ou de la hauteur des étages qui causent la plus grande partie du flux
- La hauteur du mur intermédiaire peut être inspirée de la hauteur du bâtiment ou de la hauteur du tas de gravats, voire être considérée comme une fraction de la hauteur du bâtiment.
- Le profil de vitesse d'entrée est acceptable vue à position de décollement de la couche limite. Une optimisation serait cependant souhaitable.

Ces modifications sur le domaine entrainent des modifications sur le plan de simulations que nous avions défini. Car avant de tester le mouvement du bâtiment dans le domaine, nous devrons tester les conditions aux limites proposées et définir leurs dimensions optimales.

Si le résultat est amélioré, nous introduirons les particules dans le domaine à travers le module lagrangien. En prenant dans un premier temps des particules qui restent en suspension jusqu'à ce qu'elles sortent du domaine du calcul ou jusqu'à ce qu'elles se déposent et ensuite étudier la possibilité de re-suspension.

Si le résultat n'est pas encore acceptable nous essayerons de prendre au lieu du mur fixe intermédiaire un mur de hauteur décroissante au cours de temps, et qui garde une hauteur minimale non nulle assez grande pour garder la stabilité des calculs.

Dans le cas où aucune de ces configurations ne serait acceptable, nous envisagerons un calcul avec un maillage mobile. L'objectif serait de mettre en mouvement un bâtiment du haut vers le bas du domaine. Au début de la simulation, il sera présent. A la fin de la simulation, il aura disparu.

CONCLUSION

Conclusion

Le sujet de cette thèse est l'étude de la propagation des particules produites par la démolition de bâtiment à l'explosif en vue d'en limiter les impacts sanitaires, écologiques et économiques.

Ce sujet a été motivé par le contexte environnemental et les problématiques du développement durable. Ces questions ont commencé à influencer les demandes des clients et ont conditionné l'accès à certains marchés. De ce fait, pour pouvoir apporter une réponse à ces questions, il est nécessaire d'entamer une réflexion sur cette problématique.

Nous avons organisé ce travail en 4 chapitres traitant de : la bibliographie, du protocole de mesure, puis des résultats expérimentaux et enfin de l'exploitation des résultats expérimentaux par la simulation numérique.

Dans le premier chapitre, nous avons abordé les questions : des impacts sanitaires, écologiques et économiques des poussières issues de la démolition, de l'exploitation des données issues de systèmes optiques, et des bases théoriques pour l'analyse du flux de particules et sa simulation.

Pour les impacts sanitaires écologiques et économiques, après avoir fait un inventaire des substances susceptibles d'être présentes dans les poussières issues de la démolition. Nous avons, sur la base des publications scientifiques, décrit les mécanismes d'actions de ces substances, et les éventuelles atteintes qui pouvaient en découler.

Les atteintes sur l'environnement sont : une influence sur le bilan radiatif de la planète et sur différents écosystèmes. Elles modifient la chimie de l'atmosphère, et, à l'échelle locale influencent sur la visibilité et les capacités de photosynthèse des végétaux.

Concernant les aspects sanitaires, il ressort qu'il existe quatre voies d'action : cutané, stomatologique, respiratoire et digestive. Les atteintes semblent dépendre de la quantité totale en contact avec l'une de ces voies. Ces atteintes peuvent être importantes et conduire, pour la silice, à une atteinte auto-immune : la silicose. Des suspicions de lien avec le cancer du poumon existent, mais ne semblent pas à ce jour avérées. Il semble que pour les impacts sanitaires, les employés représentent une population où les risques sont les plus importants. Pour la silice, il apparait que même une exposition unique aux poussières pourrait être source de problèmes.

L'aspect économique se limite actuellement aux coûts de nettoyage et aux charges pesant sur le secteur du BTP par le remboursement de maladies professionnelles. Toutefois, si des risques sur la santé et l'environnement étaient mis en lumière, ce coût pourrait augmenter et l'image même de la profession pourrait en pâtir.

L'exploitation des données issues de systèmes optiques est fondée sur les bases théoriques permettant :

- un traitement 2D par la géométrie projective et la corrélation d'image,
- un traitement 3D grâce aux relations entre deux vues et aux méthodes de reconstruction automatique basée sur une méthode d'appariement dépendant de la corrélation d'images.

Cette section montre les possibilités que procurent les mesures vidéo. Elles se limitent à la surface des objets observés et ne permettent pas de sonder le nuage en profondeur. Elles nous livrent un champ de déplacement des objets observés. Dans le cadre du nuage de particules, il est nécessaire que la résolution soit grande et la cadence de prise de vue élevée. Les mesures vidéo permettent de faire un traitement statistique de la turbulence.

Dans la section de modélisation d'un fluide chargé, nous avons exposé d'une part les bases théoriques nécessaires à la modélisation numérique du phénomène et d'autre part un ensemble d'outils nous permettant d'étudier et d'expliciter certains phénomènes observés. Plus spécifiquement, nous avons présenté la construction du modèle RANS.

Nous avons aussi présenté les outils descriptifs de la turbulence tels que les échelles de longueur et enfin, les différents types de corrélation. Ces outils sont utilisés dans l'étude vidéo du phénomène et les résultats servent dans le modèle numérique. Nous avons présenté l'expression de la vitesse d'une particule plongée dans un écoulement dans le but de conduire une simulation lagrangienne du phénomène et pour pouvoir évaluer les quantités de poussières présentes dans le nuage. L'exposé sur la couche limite a pour but d'expliciter certains phénomènes observés tels que le décollement. L'absorption de la lumière par les aérosols nous permet de conduire des mesures de concentrations en particules.

Dans le second chapitre, nous avons exposé le protocole expérimental que nous avons créé et mis en oeuvre.

Dans un premier temps, nous présentons la méthodologie employée pour définir les moyens à mettre en œuvre. Cette méthodologie s'est articulée autour de la confrontation des contraintes du système étudié, et des aptitudes des différents matériels de mesure. A partir de cette confrontation, un choix de dispositif de mesure s'est imposé.

Dans un second temps, nous avons présenté l'ensemble du protocole défini pour la récupération des données, que pour leurs analyses. Ce protocole concerne les prises d'échantillons et les prises vidéo. L'originalité de l'approche réside dans l'emploi de la stéréo-vidéogramétrie haute vitesse pour l'étude d'un écoulement multiphasique de grandes dimensions.

Pour finir, nous vous avons présenté les trois sites étudiés, afin de montrer la stratégie de déploiement des prises de mesure, et les différentes caractéristiques.

Le troisième chapitre expose les différents résultats des mesures : des prélèvements de particules, des vidéos, et les discussions conduites par rapport à ces mesures.

Il ressort que la répartition spatiale du dépôt semble suivre un profil gaussien. Les quantités déposées sont de l'ordre de plusieurs dizaines de tonnes pour un bâtiment de 10000 tonnes. La granulométrique s'étend de 0,1 à 300 µm. Cette granulométrie croisée avec les vitesses de chutes des particules en air calme indique que la majeure partie des particules ne se dépose pas dans un rayon proche du bâtiment. L'analyse chimique montre que les particules proviennent principalement du béton.

Les mesures vidéo 2D montrent que l'effondrement des bâtiments n'est pas du type de la chute libre. En effet on montre que celui-ci se décompose en deux phases, une accélération suivit d'une décélération. La déformation des bâtiments se localise dans la partie basse, et qu'elle ne se propage pas vers le haut. L'analyse dimensionnelle confirme que les dynamiques de chute sont semblables. Il va de même pour la dynamique du nuage. Concernant cette dernière, nous avons montré que le nuage avait 3 phases de propagation et que les vitesses d'écoulement pouvaient atteindre 17m/s. Le nuage prend la forme d'un jet avec des angles d'ouverture compris entre 20° et 30°. Les mesures de concentration indiquent que l'ordre de grandeur de la quantité de poussières (plusieurs kg/m^3). Ce qui induit une rétroaction de la phase portée sur le développement de la turbulence de l'écoulement. Nous avons pu voir que les structures turbulentes évoluaient conformément aux différentes phases de l'écoulement. Les mesures vidéo nous ont aussi permis de mettre en évidence un phénomène d'aspiration dû au mouvement du bâtiment. Enfin, nous avons pu étudier les fluctuations de vitesse induites par les tourbillons supérieurs à 10 cm.

Les premiers résultats des mesures 3D qui représentent l'évolution de notre approche métrologique. Ils permettent de définir la position du nuage par rapport au bâtiment et d'appréhender sa forme. Ils offrent une possibilité de calage et de comparaison des champs de vitesses par rapport à la simulation numérique.

Pour finir, nous présentons une analyse critique sur le processus de démolition, la création des particules et le mouvement du nuage par rapport au processus d'effondrement. La création de particules est un processus dissipatif d'énergie ; de ce fait, elle peut être vue comme la signature d'un surdimensionnement du protocole de démolition. Au final, pour avoir une action efficace sur les poussières il serait bon de conduire une réflexion sur la démolition elle-même afin de diminuer au maximum la vitesse d'effondrement.

Dans le dernier chapitre nous avons exploité les données afin commencer la simulation numérique du phénomène.

Nous avons dans un premier temps décrit le code de calcul employé. Cette présentation s'est axée autour d'une description globale du code par ses différents niveaux d'utilisation, et une explicitation des principaux sous-programmes permettant de résoudre le problème par une approche de type k-e.

Dans un second temps, nous décrivons la démarche de simulation en partant de la définition du domaine de résolution, de la condition d'entrée d'une vitesse variable et du plan de simulation employé.

Dans un troisième temps, nous exposons les résultats des simulations. Pour la première étape de la modélisation, nous considérons un domaine rectangulaire adjacent au bâtiment. Nous avons procédé à des simulations stationnaires puis instationnaires du phénomène avec une injection de vitesse constante de 10 m/s. Ces simulations ont abouti à des résultats acceptables pour le début de l'injection du flux (pour le début de la démolition), mais non acceptables, en regard des observations sur site, pour le reste de l'écoulement. La simulation instationnaire quant à elle présente le défaut d'avoir une vitesse constante d'injection qui ne permet pas de décrire la totalité du phénomène. Nos calculs montrent la nécessité d'imposer une vitesse variable au cours du temps. Pour la seconde étape de simulation, nous avons considéré un domaine de même forme, mais avec des dimensions différentes de sorte à réduire le cout de calcul, tout en gardant les mêmes propriétés aux frontières. Nous avons introduit un profil de vitesse variable au cours du temps et un scalaire passif pour visualiser simplement la forme globale du nuage. Cette simulation a abouti à un décollement de la couche limite et à la formation de flux rotatifs bien observés dans les démolitions. La distance, entre le bâtiment et ces flux, est plus petite que celle observée. Ceci est probablement dû à la présence du mur au dessus de la face d'entrée.

Ce travail est une première étape dans la réflexion. Il reste aujourd'hui beaucoup de questions à aborder.

Pour les aspects sanitaires écologiques et économiques, il conviendrait d'effectuer une étude approfondie sur les impacts des poussières de démolition et plus précisément de définir des taux d'exposition maximums. De sorte à pouvoir quantifier les risques et mettre en oeuvre des règles de protections adaptées.

Pour le protocole expérimental, nous avons acquis des données qui permettent :

- d’envisager d’autres types de mesure, notamment pour la concentration de l’écoulement.
- de nous conforter dans les choix de notre approche, notamment pour l’étude 3D de l’écoulement.

Il apparait aussi qu'une étude approfondie du processus de démolition et de la fracturation dynamique du béton est nécessaire pour bien aborder la question de la production des particules. Cette étude devra prendre en compte l'interaction du sol dans la démolition.

Concernant la simulation numérique, nous avons détaillé dans le chapitre 4 un ensemble de perspectives de simulation. Nous devrions tendre vers une simulation mettant en oeuvre un domaine incluant le mouvement du bâtiment, par l'intermédiaire d'un maillage mobile avec une injection de particules ayant une rétroaction sur l"écoulement.

REFERENCES

Références

[COL95] Colbeck, i. (1995): Particles Emission from Outdoor and Indoor Sources. In: Kouimtzi, T. and Samara, C.(eds.): Airborne Particulate Matter, Vol. 4. Berlin: Springer. - ISBN 3-540-58932-5, 1-34

[CHE96] Chester, R., Nimmo, M. & Keyse, S., 1996 The influence of saharan and middle eastern desertderived dust on the trace metal composition of mediterranean aerosols and rainwaters : an overwiev. The impact of desert dust across the Mediterraean. Kluwer Academic Publishers ,253-273.

[GUI97] Guieu, C., Chester, R., Nimmo, M., Martin, J. M., Guerzoni, S., Nicolas, E., Mateu, J. & Keyse, S. 1997 Atmospheric input of dissolved and particulate metals to the northwestern Mediterranean. Deep-Sea Research Part II - Topical Studies in Oceanography 44 , 655-674.

[PLA02] Planchon, F. A. M., Boutron, C. F., Barbante, C., Cozzi, G., Gaspari, V.,Wolff, E. W., Ferrari, C. P. & Cescon, P. 2002 Short-term variations in the occurrence of heavy metals in Antarctic snow from Coats Land since the 1920s. The Science of The Total Environment 300, 129-142.

[DAV93] Davidson, C. I., Jaffrezo, J. -L., Mosher, B. W., Dibb, J. E., Borys, R. D., Bodhaine, B. A., Rasmussen, R. A., Boutron, C. F., Gorlach, U. & Cachier, H. 1993 Chemical constituents in the air and snow at Dye 3, Greenland{I. Seasonal variations. Atmospheric Environment. Part A. General Topics 27 , 2709-2722.

[SEI86]Seinfeld, J. H. 1986 Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution. John Wiley and Sons, New York.

[KHE09] M. R. Khelifi, S. Bada, M. Al-Mukhta 2009 LES CIMENTERIES ET L'ENVIRONNEMENT CAS DE LA CIMENTERIE DE AIN-TOUTA SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009

[INR01] INRS Document pour le médecin du travail : Dermatoses professionnelles au ciment (alumino-silicates de calcium) N° 88 4e trimestre 2001

[TUR93] TURK K.,RIETSCHEL R.L. – Effect of processing cement to concrete on hexavalent chromium levels. Contact Dermatitis, 1993, 28 (4), pp. 209-211.

[AVN92] AVNSTORP C. – Cement eczema - An epidemiological intervention study. Acta. Derm.ato-Venereol.ogica Suppl.ementum, Stockholm, 1992, 179, pp. 1-22.

[CON95] CONDÉ-SALAZAR L.,GUIMARAENS D.,VILLEGAS C.,ROMERO A., GONZALES M.A. – Occupational allergic contact dermatitis in construction workers. Contact Dermatitis, 1995, 33 (4), pp. 226-230.

[OLS98] OLSAVSZKY R.,RYCROFT R. J.,WHITE I.R.,MCFADDEN J, P. – Contact sensitivity to chromate : comparison at a London contact dermatitis clinic over a 10-year period. Contact Dermatitis, 1998, 38 (6), pp. 329-331.

[PEN05] M. Penneau (Stomatologiste des Hôpitaux, professeur des Universités de médecine légale) a,*, B. Ripault (Médecin du travail, médecin légiste) b : Maladies professionnelles et stomatologie. Maladies dentaires liées à un exercice professionnel EMC-Stomatologie 1 (2005), 116–125 1769-6844/$ - see front matter © 2005 Elsevier SAS. Tous droits réservés. doi: 10.1016/j.emcsto.2005.01.001

[FRI07] P. Frimat Les dermatoses professionnelles dans le bâtiment et les travaux publics Revue française d'allergologie et d'immunologie clinique 47 (2007) 153–157

[BRO97] M.T.Brondeau, T.Clavel, M.Falcy, A.Hersbert, D.Jargot, M. Reynier, O.Schneider Silice cristalline INRS fiche toxicologique n°232 1997

[WIT05] Olivier WITSCHGER, Jean-François FABRIÈS, Particules ultra-fines et santé au travail 1 – caractéristiques et effets potentiels sur la santé INRS, Département Métrologie des polluants ND 2227 - 199 – 05 INRS - Hygiène et sécurité du travail - Cahiers de notes documentaires - 2e trimestre 2005 – 199

[AMO91] C. Amoudru Sclérodermie généralisée et inhalation de poussières mixtes contenant de silice libre INRS fiche médico-technique 1991

[REG06] RÈGLEMENT (CE) No 1272/2008 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 16 décembre 2008 relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances et des mélanges, modifiant et abrogeant les directives 67/548/CEE et 1999/45/CE et modifiant le règlement (CE) no 1907/2006 (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE)

[DEL05] Emmanuelle DELAHAIE - Risques sanitaires environnementaux liés aux poussières de démolitions d'installations nucléaires - Mémoire de l'Ecole Nationale de la Santé Publique - 2005

[GOT02] Gotoh T, Nishimura T, Nakata M, Nakaguchi Y, Hiraki K , Air pollution by concret dust from the Great Hanshin Earthquake. J Enviro Qual. 2002 May-Jun ; 31(3) :718-23

NF EN 206-1

NF EN 197-1

EN 197-1:2000

NF EN 12-620

NF P 18-302

NF P 18-306

NF P 18-309

NF P 18-307

[MOU00] E. Moudilou Cinétique et mécanismes de relargage des métaus lourd présent en traces dans les matrices cimentaire 18 Décembre 2000

[CRO09] L. Crouzeix, J.N. Périé, M. Torres, B. Douchin, F. Collombet, H. Hernández « Utilisation de la Corrélation d'Images Numériques et de la Méthode de l'Ecart à l'éQuilibre pour la caractérisation mécanique de tubes obtenus par enroulement filamentaire » Manuscrit auteur, publié dans "JNC16, Toulouse : France (2009)"

[HOR81] Berthold K.P. Horn, Brian G. Schunck, Determining optical flow, Artificial Intelligence, Volume 17, Issues 1-3, August 1981, Pages 185-203, ISSN 0004-3702, DOI: 10.1016/0004-3702(81)90024-2.
(http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0004370281900242)

[BOR07] BORNERT , Michel « Évaluation métrologique d'algorithmes de corrélation d'images numériques » 18 ème Congrès Français de Mécanique Grenoble, 27-31 août 2007 , Groupe de travail « Métrologie » du GDR CNRS 2519 « MCIMS »

[CHA10] S. CHAMBON, A. CROUZIL, M. EL MIZIANI, G. LEMARIE, P. LE CALLET Complémentarité de mesures de corrélation pour la mise en correspondance

[MGU97] S. Mguil-Touchal, F. Morestin, M. Brunet VARIOUS EXPERIMENTAL APPLICATIONS OF DIGITAL IMAGE CORRELATION METHOD , Computer Meth. and Expl Measmt, 1997, 46-58.

[RET07] Julien Rethore, Stephane Roux, Francois Hild, From pictures to extended finite elements: extended digital image correlation (X-DIC), Comptes Rendus Mecanique, Volume 335, Issue 3, March 2007, Pages 131-137, ISSN 1631-0721, DOI: 10.1016/j.crme.2007.02.003.

(http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631072107000137) Keywords: Rupture; Discontinuity; Photomechanics; Rupture; Discontinuite; Photomecanique

[FAZ09] Marina FAZZINI « DÉVELOPPEMENT DE MÉTHODES D'INTÉGRATION DES MESURES DE CHAMPS » Thèse 2009, INP LGP

[TOK95] P. T. Tokumaru, P. E. Dimotakis « Image correlation velocimetry » Experiments in Fluids 1995-05-01, Vol 19 Issue 1 p 1-15 Doi: 10.1007/BF00192228 , Springer Berlin / Heidelberg Issn: 0723-4864 Physics and Astronomy

[MIT96] AMAR MITIChE PATRICK BOUTHEMY « Computation and Analysis of Image Motion: A Synopsis of Current Problems and Methods » International Journal of Computer Vision 1996-07-01 p29-55 Vol 19 issue 1 Doi: 10.1007/BF00131147, Springer Netherlands Issn: 0920-5691 Computer Science

[GUI00] L. Gui, W. Merzkirch « A comparative study of the MQD method and several correlation-based PIV evaluation algorithms » Experiments in Fluids p36-44 vol 28 issue 1 2000-01-15, Springer Berlin / Heidelberg Issn: 0723-4864, Physics and Astronomy, Doi: 10.1007/s003480050005

[CHU85] T.C. Chu, W.F. Ranson, M.A. Sutton and W.H. Peters « Applications of Digital Image-Correlation Techniques to Experimental Mechanics » Experimental Mechanics p232-244 Vol 25 Issue 3, 1985-09-18, Springer Boston Issn: 0014-4851 Engineering Doi: 10.1007/BF02325092

[SCH02] Hubert W. Schreier and Michael A. Sutton « Systematic Errors in Digital Image Correlation Due to Undermatched Subset Shape Functions » Experimental Mechanics 2002-09-22 p 303-310 Vol 42 Issue 3 , Engineering, Springer Boston Issn: 0014-4851

[BOR09] M. Bornert · F. Brémand · P. Doumalin · J.-C. Dupré · M. Fazzini · M. Grédiac · F. Hild · S. Mistou · J. Molimard · J.-J. Orteu · L. Robert · Y. Surrel · P. Vacher · B. Wattrisse « Assessment of Digital Image Correlation Measurement Errors: Methodology and Results » , Experimental Mechanics p353-370 Vol 49 Iss 3, (2009), Springer Boston 0014-4851, Engineering 49:353–370 DOI 10.1007/s11340-008-9204-7

[HIL02] François Hild, Bumedijen Raka, Maud Baudequin, Stéphane Roux, and Florence Cantelaube « Multiscale displacement field measurements of compressed mineral-wool samples by digital image corrélation » © 2002 Optical Society of America OCIS codes: 070.2590, 100.2000, 100.5010, 120.3940, 120.6150, 040.1520.

[BER04] S. Bergonnier, F. Hild , S. Roux ÉSSAIS MÉCANIQUES SUR LAINE DE VERRE CRÊPÉE ANALYSÉS PAR CORRÉLATION D'IMAGE , 2004

[CLA03] Damien Claire , François Hild , Stéphane Roux « De la corrélation d'images numériques à l'identification de champs de propriétés », HAL – CCSD, 2003, INRIA a CCSD electronic archive server based on P.A.O.L [http://hal.inria.fr/oai/oai.php] (France)

[WAG02] Babacar Wagne, Stéphane Roux Fraçois Hild « Spectral Approach to Displacement Evaluation From Image Analysis » , Physique/Mécanique/Mécanique des

matériaux Sciences de l'ingénieur/Mécanique/Mécanique des matériaux, European Physical Journal Applied Physics 17 (2002) 247-252, DOI : 10.1051/epjap:2002019

[ROU02] S. Roux, F. Hild, and Y. Berthaud, "Correlation Image Velocimetry: A Spectral Approach," Appl. Opt. 41, 108-115 (2002)

[CHE05] L.Chevalier, S.Calloch, F.Hild and Y.Marco « Digital Image Correlation used to Analyse the Multiaxial Behavio of Rubber-like Materials », Classical Physics, European Journal of Mechanics A/Solids 20 (2001) 169-187 17 Nov 2005

[MON99] Jérôme Monteil Azeddine Behgdadi « Une méthode rapide et robuste d'estimation du champs de déplacement » Vision Interface '99, Trois-Rivières, Canada, 19-21 May

[LEC06] Bertrand Lecordier et Michel Trinité Comparaison des performances des méthodes d'interpolation d'images pour la PIV à l'aide d'images réelles de particules Congrès Francophone de Techniques Laser, CFTL 2006, Toulouse, 19 - 22 septembre 2006

[VAC99] P. Vacher, A. Haddad, R. Arrieux, Determination of the Forming Limit Diagrams Using Image Analysis by the Corelation Method, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 48, Issue 1, 1999, Pages 227-230, ISSN 0007-8506, DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63171-0.
(http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607631710) Keywords: Strain measurement; Image analysis; Forming limit diagrams

[VAN09] Steve Vanlanduit, Joris Vanherzeele, Roberto Longo, Patrick Guillaume, A digital image correlation method for fatigue test experiments, Optics and Lasers in Engineering, Volume 47, Issues 3-4, Optical Measurements, March-April 2009, Pages 371-378, ISSN 0143-8166, DOI: 10.1016/j.optlaseng.2008.03.016.
(http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816608000511) Keywords: Digital image correlation; Fatigue crack; Image processing

[SUT00] Michael A. Sutton, Stephen R. McNeill, Jeffrey D. Helm, and Yuh J. Chao Advances in Two-Dimensional and Three-Dimensional Computer Vision P. K. Rastogi (Ed.): Photomechanics, Topics Appl. Phys. 77, 323–372 (2000) _c Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2000

[SUT83] MA Sutton, WJ Wolters, WH Peters, WF Ranson, SR McNeill, Determination of displacements using an improved digital correlation method, Image and Vision Computing, Volume 1, Issue 3, August 1983, Pages 133-139, ISSN 0262-8856, DOI: 10.1016/0262-8856(83)90064-1.
(http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0262885683900641) Keywords: digital; processing; displacements

[HOL98] G. Holst, CCD Arrays, Cameras and Displays, SPIE Engineering Pres, Washington DC (USA), 1998.

[CHA03] S. Chambon & A. Crouzil. Dense matching using correlation : new measures that are robust near occlusions. Proceedings of British Machine Vision Conference (BMVC'2003), East Anglia, Norwich, UK, pages 143-152, 2003.

[MAI89] G.E. Mailloux, F. Langlois, P.Y. Simard and M. Bertrand, «Restoration of the velocity field of the heart from twodimensional echocardiograms», IEEE Trans. Med. Imag., Vol.MI 8, n°2, pp. 143-153, 1989.

[MON93] Rosaire Mongrain, «Estimation de paramètres hémodynamiques à l'aide de séquences angiographiques», Thèse Ph.D., Université de Montréal, 1993.

[RUA93] S. Ruan, A. Bruno, R. Collorec and J.L. Coatrieux, «Estimation de mouvement 3D en coronarographie», Innov. Techn. Biol. Med., Vol.14, n° 2, pp.189-198, 1993.

[GOR94] J.M. Gorce, D.Friboulet, I.E. Magnin, «Méthode d'estimation du mouvement des parois cardiaques à partir d'images 3D», Innov. Techn. Biol. Med., Vol.15, n° 5, 1994.

[AMA96] N.Ben Amar, A. Beghdadi and P. Viaris de Lesegno, «An all-digital method for accurate measurements of mechanical deformations», Scanning, Vol. n°18, pp. 327-330, 1996.

[MON96] J.Monteil, A. Beghdadi and P. Viaris de Lesegno, «Adaptation du flux optique à la mesure du champ de déformation des matériaux rigides», 19th french session of ISS, Paris, 1996.

[WU95] Wu Qing X., «A correlation-relaxation-labeling framework for computing optical flow - template matching from a new perspective», IEEE Trans. Pattern Anal. and Machine Intell., Vol.17, n° 8, pp.843-853, 1995.

[HOR93] Radu HORAU, Olivier MONGA "Vision par ordinateur : outils fondamentaux" Editions Hermès, 1995 - deuxième édition revue et augmentée.

[ZHA99] Zhengyou Zhang « Flexible Camera Calibration By Viewing a Plane From Unknown Orientations » Microsoft Research, One MicrosoftWay, Redmond,WA 98052-6399, USA 0-7695-0164-8/99 $10.00 (c) 1999 IEEE

[WAN07] JianhuaWang∗, Fanhuai Shi, Jing Zhang,Yuncai Liu « A newcalibration model of camera lens distortion » 0031-3203/$30.00 _ 2007 Pattern Recognition Society. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved. doi:10.1016/j.patcog.2007.06.012

[AND98] N.Andreff, B.Espiau et R.Horaud « Une méthode d'auto-étalonnage pince-caméra » INRIA No 3507 Octobre 1998 ISSN 0249-6399

[FRY94] Fryer, J.G. Clarke, T.A. & Chen, J., 1994. « Lens distortion for simple 'C' mount lenses" », International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 30(5): 97-101.

[DAU94] N.Daucher, M.Dhome, J.T. Lapreste « étalonnage de caméra à partir d'images associées de sphères et de grilles » traitement du signal 1994 – Volume 11 n°1

[WEN92] Juyang Weng, Member, IEEE, Paul Cohen, and Marc Herniou Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation IEEE TRANSACTIONS ON PAmRN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE, VOL. 14, NO. 10, OCTOBER 1992

[YOS09] Michifumi Yoshioka and Sigeru Omatu « Camera Calibration Method Based on Maximum Likelihood Estimation » S. Omatu et al. (Eds.): IWANN 2009, Part II, LNCS 5518, pp. 616–620, 2009. _c Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009

[LAV98] Jean-Marc Lavest, y Marc Viala, _ M. Dhome « Do We Really Need an Accurate Calibration Pattern to Achieve a Reliable Camera Calibration ? » H. Burkhardt and B. Neumann (Eds.): ECCV '98, Vol. I, LNCS 1406, pp. 158{174, 1998. c Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1998

[AME02] Marc-André Ameller Long Quan Bill Triggs « Le Calcul de Pose : de nouvelles méthodes matricielles » Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle (RFIA '02) 1 (2002) 39--47"

[MAU02] Benjamin Maurin Christophe Doignon Michel de Mathelin1 Afshin Gangi2 « Algorithmes d'estimation automatique de la pose pour la radiologie interventionelle assistée par ordinateur » In 13ème Congrès AFCET de Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle. . pages 39–47. 2002

[CIP99] R. Cipolla T.Drummond and D.Robertson « Camera calibration from vanishing points in images of architectural scene » BMVC99

[GUI00] Guillou, E Meneveaux, D. Maisel, E. Bouatouch, K. « Using vanishing points for camera calibration and coarse 3D reconstruction from a single image »,The Visual Computer, 2000-11-08, Springer Berlin / Heidelberg, 0178-2789, Computer Science , p396-410,Volume: 16 Issue: 7 Doi: 10.1007/PL00013394

[SUV06] Nikom Suvonvorn Mise en Correspondance d'Images pour l'Analyse du Mouvement et la Stéréovision Soutenue le 18 décembre 2006

[KAL09] Mahzad KALANTARI APPROCHE DIRECTE DE L'ESTIMATION AUTOMATIQUE DE L'ORIENTATION 3D D'IMAGES le 4 septembre 2009 à l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques

[JON06] Claire JONCHERY Estimation d'un mouvement de caméra et problèmes connexes. Th_ese pr_esent_ee et soutenue _a Cachan le 6 novembre 2006

[COR05] Cornille, Nicolas Accurate 3D shape and displacement measurement using a scanning electron microscope by, PhD, UNIVERSITY OF SOUTH CAROLINA, 2005, 0 pages; 3181938 Thèse préparée à l'Ecole des Mines d'Albi-Carmaux et à l'Université de Caroline du Sud Soutenue le 20 juin 2005

[TOS87] TOSCANI, G.; FAUGERAS, O. D. Mouvement par reconstruction et reprojection GRETSI, Groupe d'Etudes du Traitement du Signal et des Images Date: 1987

[CLE01] CLERC, Patrice. Mesure de champs de déplacements et de déformations par stéréovision et corrélation d'images numériques [En ligne] Thèse : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2001 [08/12/2004]

[HAR03] Richard Hartley, Andrew Zisserman « Multiple View Geometry in computer vision » , Cmbridge University Press, cop. 2003 , 0-521-54051-8(br.). – 978-0-521-54051-3(br.)

[KRA97] Karl Kraus, Peter Waldhäusl , Pierre Grussenmeyer Olivier Reis, « Manuel de photogrammétrie, principes fondamentaux » 12-1997 Hermes.

[FAU93] Faugeras, O. Three-Dimensional Computer Vision : A Geometric Viewpoint. MIT Press. 1993

[FAU00] Faugeras, O., Luong, Q., and Papadopoulo, T. The Geometry of Multiple Images. MIT Press, 2000.

[OES06] B. Oesterlé « Ecoulement multiphasiques » Hermes Lavoisier 2006

[CHA00] P. Chassing « Mécanique des fluides » Cépaduès-éditions Polytech, Toulouse2000 ISBN :2,85428,509,3

[CHA00] P. chassing « Turbulence en mécanique des fluides » Cépaduès-éditions Polytech, Toulouse 2000

[REN98] A. Renoux D.Boulaud « Les aérosols Physique et métrologie » Lavoisier Tec & Doc 1998 ISBN 2-7430-0231-X

[HIN82] W.C . HINDS « Aerosol Technology, Properties, Behavior, and Measurment of Airborne Particles » John Wiley &sons,inc. 1982 ISBN 0-471-19470-7

[PAD91] J. Padet « Fluides en écoulement méthodes et modèles » Masson 1991. ISBN : 2-225-82092-9

[COI01]J. Coirier « mécanique des milieux continus, cours et exercies corrigés » DUNOD2nd édition Paris 2001

[DOM97] J-F Doming, D G.F. Huillier, P.Gardin, H. Burnage « Application of an eulerien-lagragian model to the turbulent dispertion of particles in turbulent pipe flows » ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, 22-26 june 1997

[KUN08] Pijusch k. Kundu , Ira M. Cohen "Fluid Mechanics" 4th edition Academics Press imprint of Elsevier 2008

[BRE05] Christopher E. Brennen "Fundamentals of Multiphase Flows" Cambridge University Press ISBN-13 978-0-521-84804-6

[CIS10] TitaNobel les dispositifs de découpages – CISALEX/CISALITE Edition 06/10

[COR10] TitaNobel les cordeaux détonant – TITACORD Edition 06/10

Résumé

La démolition de bâtiments par foudroyage est une technique devenue classique. Elle génère des nuisances qui doivent être prises en compte, sous peine de rendre caduc ce type d'activité. Les principales nuisances générées par le foudroyage sont :

- les projections générées par l'explosion et la dislocation du bâtiment ;
- l'onde de surpression générée par l'explosif ;
- la vibration du sol induite par l'effondrement du bâtiment ;
- la création et la propagation d'un nuage de poussière.

Les deux premiers points sont maitrisés. En ce qui concerne les vibrations, aucune méthode n'existe pour les limiter. Seuls, des fossés creusés permettent de bénéficier d'un effet d'ombre vis-à-vis de certains bâtiments. Les nuisances générées par les poussières et les manières de les limiter commencent à être une question fréquemment posée. Dans le cadre de la destruction d'installation classée pour la protection de l'environnement, cette question devient critique, car ce nuage peut déplacer des particules nocives.

Actuellement, aucune information sur les mécanismes de production ou sur les mécanismes de propagation des poussières n'a été élaborée. Cette thèse propose un protocole de mesure pour l'étude des caractéristiques du nuage de particule. Elle présente les premières informations sur la production et la propagation des particules. Et pour finir, elle présente les premières simulations numériques du phénomène.

Mots clés: *Démolition, Foudroyage, Turbulence, Ecoulements multiphasiques denses, Etude expérimentale, corrélation d'images, simulation numérique*

Abstract

The demolition of buildings caving is a technique which has become classic. The demolition generates nuisance that must be taken into account, under penalty of rendering this type of demolition. The main nuisance generated by the caving are:

- The projections generated by the explosion and the disintegration of the building;
- The pressure wave generated by the explosive;
- The ground vibration induced by the collapse of the building;
- The creation and spread of a cloud of dust.

The first two points are controlled. With regard to vibration, no method exists to limit them. Only the ditches can provide access to a shadow effect vis-à-vis some buildings. Nuisances generated by dust and ways to limit them begin to be a common question. As part of the destruction of classified installations for environmental protection, this issue becomes critical because the cloud can move harmful particles.

Currently, no information on the mechanisms of production or on the mechanisms of spread of dust has been developed. This thesis proposes a measurement protocol for the study of the characteristics of cloud particles. It prensetes the first information on the production and propagation of the particles. And finally presents the first numerical simulation of the phenomenon.

Keywords: *Demolition, Bulding colapse, turbulencs, multiphase flows, Experimental study, Images corelation, numerical simulation.*