

Dosage des granulats : étude des phénomènes d'écoulement et de voûte Application à la conception des trémies doseuses

Daudet RANAÏVOSON

études et recherches
des laboratoires des ponts et chaussées

pc

série géotechnique GT46

Conformément à la note du 04/07/2014 de la direction générale de l'Ifsttar précisant la politique de diffusion des ouvrages parus dans les collections éditées par l'Institut, la reproduction de cet ouvrage est autorisée selon les termes de la licence CC BY-NC-ND. Cette licence autorise la redistribution non commerciale de copies identiques à l'original. Dans ce cadre, cet ouvrage peut être copié, distribué et communiqué par tous moyens et sous tous formats.



(CC BY-NC-ND 4.0)



Attribution — Vous devez créditer l'Oeuvre et intégrer un lien vers la licence. Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens possibles mais vous ne pouvez pas suggérer que l'Ifsttar vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son Oeuvre.



Pas d'Utilisation Commerciale — Vous n'êtes pas autorisé à faire un usage commercial de cette Oeuvre, tout ou partie du matériel la composant.



Pas de modifications — Dans le cas où vous effectuez une adaptation, que vous transformez, ou créez à partir du matériel composant l'Oeuvre originale (par exemple, une traduction, etc.), vous n'êtes pas autorisé à distribuer ou mettre à disposition l'Oeuvre modifiée.

Le patrimoine scientifique de l'Ifsttar

Le libre accès à l'information scientifique est aujourd'hui devenu essentiel pour favoriser la circulation du savoir et pour contribuer à l'innovation et au développement socio-économique. Pour que les résultats des recherches soient plus largement diffusés, lus et utilisés pour de nouveaux travaux, l'Ifsttar a entrepris la numérisation et la mise en ligne de son fonds documentaire. Ainsi, en complément des ouvrages disponibles à la vente, certaines références des collections de l'INRETS et du LCPC sont dès à présent mises à disposition en téléchargement gratuit selon les termes de la licence Creative Commons CC BY-NC-ND.

Le service Politique éditoriale scientifique et technique de l'Ifsttar diffuse différentes collections qui sont le reflet des recherches menées par l'institut :

- Les collections de l'INRETS, Actes
- Les collections de l'INRETS, Outils et Méthodes
- Les collections de l'INRETS, Recherches
- Les collections de l'INRETS, Synthèses
- Les collections du LCPC, Actes
- Les collections du LCPC, Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées
- Les collections du LCPC, Rapport de recherche des laboratoires des ponts et chaussées
- Les collections du LCPC, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Guide technique
- Les collections du LCPC, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Méthode d'essai



Institut Français des Sciences et Techniques des Réseaux,
de l'Aménagement et des Transports
14-20 Boulevard Newton, Cité Descartes, Champs sur Marne
F-77447 Marne la Vallée Cedex 2

Contact : diffusion-publications@ifsttar.fr

www.ifsttar.fr



Dosage des granulats : étude des phénomènes d'écoulement et de voûte Application à la conception des trémies doseuses

Daudet RANAÏVOSON

Octobre 1991

LCPC



Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
58, bd Lefebvre, F 75732 Paris Cedex 15

Collection «Études et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées»,
série géotechnique, ISSN 1157-3910.
Fait suite à la collection «Rapports des laboratoires»,
série géotechnique - mécanique des sols - sciences de la terre, ISSN 0761-2389.

Daudet RANAÏVOSON est Docteur de l'Université de Nantes,
il travaille à la Division Matériaux et matériels de construction routière,
au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

*Ce rapport est extrait du mémoire de la thèse de doctorat
de l'université de Nantes - École nationale supérieure de mécanique,
soutenue le 12 janvier 1990 par M. Ranaivoson et préparée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
sous la direction de M. Baroux.*

Diffusion :
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
IST - Section des publications
58, bd Lefebvre, F 75732 Paris Cedex 15
☎ 33 (1) 40 43 52 26 - Télécopie : 33 (1) 40 43 54 98

NOTATIONS	1
INTRODUCTION	5
CHAPITRE 1 – PRINCIPAUX ELEMENTS DE LA BIBLIOGRAPHIE	7
1.1 – DOSAGE DES MATERIAUX GRANULAIRES DANS LES CENTRALES DE FABRICATION	9
1.1.1 – STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DES CENTRALES DE FABRICATION	9
1.1.1.1 – STRUCTURE	9
1.1.1.2 – FONCTIONNEMENT	9
1.1.2 – STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DES DOSEURS A GRANULATS	11
1.1.2.1 – STRUCTURE	11
1.1.2.2 – FONCTIONNEMENT	11
1.1.3 – MODES D'ECOULEMENT EN TREMIE	12
1.1.3.1 – ECOULEMENT EN MASSE	12
1.1.3.2 – ECOULEMENT EN CHEMINEE OU A NOYAU	12
1.1.4 – PROBLEMES DE DOSAGE	12
1.1.4.1 – FORMATION DE VOUTE	12
1.1.4.2 – STABILISATION DE LA CHEMINEE	13
1.1.4.3 – LE FUSAGE	14
1.1.4.4 – ECOULEMENT IRRÉGULIER	14
1.1.5 – AIDE A L'ECOULEMENT DES MATERIAUX VRACS	14
1.1.5.1 – CONCEPTION ADEQUATE DU SYSTEME D'EXTRACTION	14
1.1.5.2 – EQUIPEMENTS ANNEXES	15
1.2 – COMPORTEMENT DES MATERIAUX ET PROPRIETES D'ECOULEMENT	19
1.2.1 – COMPORTEMENT DES MATERIAUX PENDANT L'ECOULEMENT	19
1.2.1.1 – MATERIAU GRANULAIRE EN TANT QUE CONTINUUM	19

1.2.1.1.1 - APPROCHE PAR LA MECANIQUE DES FLUIDES	19
1.2.1.1.2 - APPROCHE PAR LA THEORIE DU MILIEU EQUIVALENT CONTINU	19
1.2.1.1.3 - APPROCHE PAR LA MECANIQUE DES SOLS	21
1.2.1.2 - MATERIAU GRANULAIRE EN TANT QUE MILIEU DISCRET	23
1.2.1.2.1 - APPROCHE PAR LA MECANIQUE STATISTIQUE	23
1.2.1.2.2 - APPROCHE PUREMENT CINEMATIQUE	23
1.2.1.2.3 - AUTRES APPROCHES	23
1.2.2 - PROPRIETES D'ECOULEMENT DES MATERIAUX ET DE L'ENCEINTE	24
1.2.2.1 - DEFINITION ET DETERMINATION DES PROPRIETES D'ECOULEMENT	24
1.2.2.2 - CRITERE D'ECOULEMENT - NON - ECOULEMENT	26
1.2.2.3 - FACTEURS INFLUANTS SUR LES PROPRIETES D'ECOULEMENT DES MATERIAUX	28
1.3 - ANALYSE DES CONTRAINTES DANS UNE TREMIE	28
1.3.1 - DETERMINATION DES CONTRAINTES EN STATIQUE ET PENDANT L'ECOULEMENT EN MASSE	28
1.3.1.1 - METHODE DE L'EQUILIBRE D'UNE TRANCHE INFINITESIMALE	28
1.3.1.2 - METHODE DE L'EQUILIBRE D'UN ELEMENT INFINITESIMAL	29
1.3.1.2.1 - CHAMP DE CONTRAINTE RADIALE	29
1.3.1.2.2 - CARACTERISTIQUES DES CONTRAINTES	30
1.3.1.3 - CONTRAINTES PENDANT LA PHASE INITIALE DE L'ECOULEMENT	31
1.3.2 - ETUDE DE L'ECOULEMENT EN CHEMINEE	31
1.3.2.1 - CONTRAINTES DEVELOPPEES PENDANT L'ECOULEMENT EN CHEMINEE ET DIMENSIONNEMENT.	31
1.3.2.2 - LIMITE ENTRE ECOULEMENT EN MASSE ET FORMATION DE CHEMINEE OU DE VOUTE.	32
1.3.2.3 - FRONTIERE ENTRE CHEMINEE ET ZONE STAGNANTE	34
1.3.3 - THEORIES APPROXIMATIVES SUR LA FORMATION DE VOUTE	35
1.3.4 - MESURE DES CONTRAINTES	39
1.4 - ANALYSE DU CHAMP DE VITESSE DANS UNE TREMIE	40
1.4.1 - DETERMINATION DE LA VITESSE D'ECOULEMENT	40
1.4.1.1 - CARACTERISTIQUES DE VITESSE	40
1.4.1.2 - CHAMP DE VITESSE RADIALE	42
1.4.1.3 - CHAMP DE VITESSE ISSU D'UN MODELE CINEMATIQUE.	42

<i>1.4.2 - DETERMINATION DU DEBIT MAXIMAL D'ECOULEMENT</i>	43
1.4.2.1 - GENERALITE	43
1.4.2.2 - MODELE DE SAVAGE - MODELE DE DAVIDSON et NEDDERMAN	44
1.4.2.3 - MODELE DE J.C. WILLIAMS	45
1.4.2.4 - MODELE DE BROWN ET RICHARD (MINIMUM ENERGY THEOREM)	46
1.4.2.5 - MODELE DE J.R JOHANSON	47
1.4.2.6 - DISCUSSION SUR DIFFERENTS MODELES DE DEBIT	48
<i>1.4.3 - TECHNIQUE DE VISUALISATION ET DE MESURE DE LA VITESSE D'ECOULEMENT</i>	48
1.4.3.1 - METHODE DES MARQUAGES	48
1.4.3.2 - TECHNIQUE STEREOPHOTOGRAMMETRIQUE	49
1.4.3.3 - METHODE DE LA DETECTION	50
1.5 - BILAN	50
CHAPITRE 2 - APPROCHE THEORIQUE DE L'ECOULEMENT EN VUE DU DOSAGE	51
2.1 - INTRODUCTION	53
2.2 - L'ECOULEMENT RADIAL EN MASSE	53
<i>2.2.1 - EQUATIONS GENERALES DES CONTRAINTES ET DE LA FONCTION DE DISTRIBUTION DE VITESSE</i>	53
2.2.1.1 - HYPOTHESES	53
2.2.1.2 - FORMULATION DU PROBLEME	54
2.2.1.3 - EQUATIONS DU MOUVEMENT	56
<i>2.2.2 - CONDITIONS AUX LIMITES</i>	58
2.2.2.1 - CONDITIONS SUR L'AXE CENTRAL	59
2.2.2.2 - CONDITIONS A LA PAROI	59
<i>2.2.3 - APPROCHE DE LA DISTRIBUTION DE VITESSE</i>	61
2.2.3.1 - CAS D'UNE VIDANGE SIMPLE	61
2.2.3.2 - CAS DU DOSAGE	62
2.2.3.3 - CAS GENERAL	63
<i>2.2.4 APPROCHE DU DEBIT D'ECOULEMENT</i>	64
2.2.4.1 - CAS D'UN ECOULEMENT NATUREL	64
2.2.4.2 - CAS D'ECOULEMENT FREINE	65
2.2.4.3 - CAS GENERAL	65

2.2.5 - APPROCHE DE LA DISTRIBUTION DE VITESSE ET DE LA CONTRAINTE DEVELOPPEES PENDANT LE DOSAGE 66

2.2.6 - ANALYSE DES RESULTATS 67

2.2.6.1 - VARIATION DU DEBIT EN FONCTION DE LA CONTRAINTE A LA SORTIE	67
2.2.6.2 - DISTRIBUTION DE LA VITESSE DANS UNE TREMIE PENDANT LE DOSAGE	68
2.2.6.3 - REPARTITION DE LA CONTRAINTE SUR LA PAROI D'UNE TREMIE DOSEUSE	68
2.2.6.4 - SYNTHESE	72

2.3 - FORMATIONS DE VOUTE ET DE CHEMINEE 72

2.3.1 - FORMATION DE VOUTE STABLE	72
2.3.2 - ECOULEMENT EN MASSE CRITIQUE	74
2.3.3 - FORMATION DE CHEMINEE	74

2.3.3.1 - CAS 1 $\varphi_p < \varphi_M$	75
2.3.3.2 - CAS 2 $\varphi_p \geq \varphi_M$ (paroi très rugueuse)	76

2.3.4 - ANALYSE DES RESULTATS 77

2.3.4.1 - PREDICTION DE LA GEOMETRIE CRITIQUE POUR LA FORMATION DE VOUTE STABLE	77
2.3.4.2 - PREDICTION DE LA GEOMETRIE CRITIQUE POUR L'ECOULEMENT EN MASSE	80
2.3.4.3 - APPROCHE DE LA FRONTIERE DE LA CHEMINEE AU DEBUT DE L'ECOULEMENT	83
2.3.4.4 - SYNTHESE	83

2.4 - LE DISPOSITIF DE DOSAGE DES GRANULATS 85

2.4.1 - EFFORTS MOBILISES DANS LA ZONE D'EXTRACTION 85

2.4.1.1 - CHARGE EXERCEE PAR LE CONTENU DE LA TREMIE	86
2.4.1.2 - POIDS DU MATERIAU SITUE ENTRE LE PLAN DE RUPTURE ET LE TAPIS	86
2.4.1.3 - FORCE DE FROTTEMENT SUR LES JOUES DE LA TREMIE	88
2.4.1.4 - REACTION DU TAPIS	88

2.4.2 - CONDITION DE NON-GLISSEMENT MATERIAU-TAPIS. 89

2.4.3 - PERFORMANCE DU DISPOSITIF DE DOSAGE 89

2.4.3.1 - PUISSANCE DEVELOPPEE PAR LE MOTEUR	89
2.4.3.2 - ENERGIE DEVELOPPEE PAR LE MOTEUR	
2.4.3.3 - PERFORMANCE DU DISPOSITIF DE DOSAGE	90
2.4.3.4 - ENERGIE SPECIFIQUE	91

2.4.4 - ANALYSE DES RESULTATS 91

2.4.4.1 - CONSIDERATION DU FROTTEMENT MATERIAU-TAPIS	91
2.4.4.2 - CONSIDERATION ENERGETIQUE	91
2.4.4.3 - SYNTHESE	94

CHAPITRE 3 – DETERMINATION ET ANALYSE DES CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX	95
3.1 – MATERIAUX	97
3.1.1 – CHOIX DES MATERIAUX	97
3.1.2 – CHOIX DES TENEURS EN EAU	98
3.2 – ESSAIS DE CARACTERISATION DES MATERIAUX	99
3.2.1 – DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES PHYSICO-GEOMETRIQUES DES MATERIAUX	99
3.2.2 – DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES DE CISAILLEMENT DES MATERIAUX	104
3.3 – ANALYSE DES RESULTATS	106
3.3.1 – TECHNIQUE DE L'ANALYSE FACTORIELLE EN COMPOSANTE PRINCIPALE ET STRUCTURATION DES DONNEES	106
3.3.2 – INTERPRETATION DES RESULTATS	108
3.3.2.1 – CARACTERISTIQUES PHYSICO-GEOMETRIQUES DE TOUS LES MATERIAUX	108
3.3.2.2 – CARACTERISITQUES PHYSICO-GEOMETRIQUES DES MATERIAUX AVEC FINES	115
3.3.2.3 – COMPORTEMENT AU COMPACTAGE DES MATERIAUX AVEC FINES	121
3.3.2.4 – RESISTANCE AU CISAILLEMENT DES SABLES DE LOIRE	125
3.3.3 – SYNTHESE	131
CHAPITRE 4 – EXPERIMENTATIONS SUR MODELES REELS	133
4.1 – INSTALLATIONS ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX	135
4.1.1 – BANC D'ESSAI DES DOSEURS A GRANULATS	135
4.1.2 – IMPLANTATION DES DETECTEURS	135
4.1.2.1 – DETECTEUR D'INDIUM 113 – DETECTEUR 1	135
4.1.2.2 – DETECTEURS D'EPAISSEUR ET DE DENSITE DE MATERIAU	137
4.1.3 – DISPOSITIF DE MARQUAGE	137
4.2 – METHODE DE MESURE	138
4.2.1 – MARQUAGE PAR TRACEUR RADIOACTIF	138
4.2.1.1 – LE TRACEUR RADIOACTIF	138
4.2.1.2 – MODE DE MARQUAGE	138

4.2.2 - MESURE DE L'ÉPAISSEUR ET DE LA DENSITÉ DU MATÉRIAU	140
4.2.3 - ACQUISITION DES DONNÉES	141
4.3 - ESSAIS RÉALISÉS	142
4.3.1 - MATÉRIAUX	142
4.3.2 - TREMIÉS	142
4.4 - MÉTHODES D'EXPLOITATION DES MESURES	144
4.4.1 - TRAITEMENT DU SIGNAL INDIUM-REPRÉSENTATION DES LIGNES DE RUPTURE	144
4.4.1.1 - DESCRIPTION DU SIGNAL INDIUM	144
4.4.1.2 - MODÉLISATION DU SIGNAL INDIUM	146
4.4.1.3 - ÉVOLUTION DE LA LIGNE MARQUÉE PENDANT L'ÉCOULEMENT	146
4.4.1.4 - SCHEMATISATION DES LIGNES DE RUPTURE	148
4.4.2 - TRAITEMENT DE L'ENREGISTREMENT DE LA DENSITÉ DE MATÉRIAU À LA BASE DE LA TREMIÉ	149
4.4.2.1 - CRITÈRE D'HOMOGENÉITÉ	149
4.4.2.2 - MÉTHODE DE DÉCOUPAGE	149
4.4.2.3 - ALGORITHME DE DÉCOUPAGE	149
4.5 - ANALYSE DES RÉSULTATS	150
4.5.1 - INTERPRÉTATION DES SCHEMAS DES LIGNES DE RUPTURE	150
4.5.1.1 - MODE D'ÉCOULEMENT	150
4.5.1.2 - INFLUENCE DE LA GÉOMÉTRIE DE LA TREMIÉ	150
4.5.1.3 - INFLUENCE DES PROPRIÉTÉS D'ÉCOULEMENT DU MATÉRIAU	151
4.5.2 - INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DU TRAITEMENT DE LA DENSITÉ	156
4.5.2.1 - PHASE INITIALE DE L'ÉCOULEMENT	156
4.5.2.2 - INFLUENCE DE LA TENEUR EN EAU	157
4.5.2.3 - CLASSIFICATION DES MATÉRIAUX SUIVANT LE COMPORTEMENT AU DOSAGE	157
4.5.2.4 - COMPARAISON DES DEUX TREMIÉS	158
4.5.2.5 - EFFET DE LA PRÉSENCE D'UN DISPOSITIF ANTI-VOÛTE SUR L'ENREGISTREMENT DE LA DENSITÉ	158
4.5.3 - SYNTHÈSE	162

CHAPITRE 5 - EXPERIMENTATIONS SUR MODELE REDUIT A GEOMETRIE VARIABLE	163
5.1 - OBJECTIFS	165
5.2 - DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX	165
5.2.1 - LE MODELE REDUIT A GEOMETRIE VARIABLE	165
5.2.2 - LA CENTRIFUGEUSE	167
5.2.2.1 - CHOIX DE L'EXPERIMENTATION EN CENTRIFUGEUSE	167
5.2.2.2 - L'INSTALLATION	167
5.2.3 - MATERIELS VIDEO	167
5.3 - METHODES DE MESURE	168
5.3.1 - MESURE DU DEBIT D'ECOULEMENT	168
5.3.2 - MARQUAGE PAR POINTS COLORES	168
5.3.3 - MESURE DE LA VITESSE DU TAPIS	169
5.3.4 - MODE OPERATOIRE	169
5.4 - LES ESSAIS REALISES	169
5.4.1 - MATERIAUX	169
5.4.2 - VERIFICATION DE LA BIDIMENSIONNALITE DE L'ECOULEMENT.	170
5.4.3 - ETALONNAGE DES PESONS	170
5.4.4 - ETALONNAGE DU CAPTEUR DE VITESSE DU TAPIS	170
5.4.5 - DEROULEMENT DES ESSAIS	172
5.5 - TRAITEMENT D'IMAGES ET EXPLOITATIONS	173
5.5.1 - MATERIELS.	173
5.5.2 - LOGICIEL D'ANALYSE	173
5.5.3 - FREQUENCE D'ANALYSE	175
5.5.4 - SUIVI D'UN POINT COLORE	176
5.5.4.1 - INITIALISATION	176
5.5.4.2 - DETERMINATION DE LA ZONE DE RECHERCHE DU POINT	176
5.5.4.3 - DETERMINATION DU CENTRE DE GRAVITE DU POINT	176
5.5.5 - VISUALISATION DES TRAJECTOIRES DES POINTS	177
5.5.6 - DETERMINATION DE LA DISTRIBUTION DE VITESSE EN ECOULEMENT DE MASSE	178
5.5.6.1 - VITESSES INDIVIDUELLES DES POINTS MARQUEURS	178
5.5.6.2 - DISTRIBUTION DE VITESSE DANS LA TREMIE	178

5.5.7 - DETERMINATION DE LA VITESSE MOYENNE DU TAPIS	179
5.5.8 - CALCUL DU DEBIT D'ECOULEMENT	179
5.5.9 - CALCUL DE LA DUREE DE VIDANGE	180
5.6 - ANALYSE DES RESULTATS	181
5.6.1 - OBSERVATIONS SUR LA DETERMINATION DU DEBIT, DE LA VITESSE DU TAPIS ET DU TEMPS DE VIDANGE	181
5.6.2 - OBSERVATIONS SUR LE SUIVI DES POINTS COLORES	182
5.6.3 - VERIFICATION DE LA REPETITIVITE	182
5.6.4 - MECANISME DE L'ECOULEMENT EN FONCTION DE LA GEOMETRIE	185
5.6.4.1 - FORMATION DE VOUTE STABLE	185
5.6.4.2 - ECOULEMENT PARTIEL - ECOULEMENT EN CHEMINEE	187
5.6.4.3 - ECOULEMENT EN MASSE	188
5.6.5 - LINEARITE DU DEBIT AVEC L'EPAISSEUR DE VEINE DE MATERIAU	189
5.6.6 - SYNTHESE	194
CHAPITRE 6 - ANALYSE GENERALE - CHOIX DE LA GEOMETRIE D'UNE TREMIE DE DOSAGE	197
6.1 - CONFRONTATION DES ETUDES BIBLIOGRAPHIQUE, THEORIQUE ET EXPERIMENTALE	199
6.1.1 - COMPORTEMENT DES MATERIAUX PENDANT L'ECOULEMENT	199
6.1.2 - PREDICTION THEORIQUE DES DIMENSIONS D'UNE TREMIE SUIVANT LE MODE D'ECOULEMENT	200
6.1.3 - MECANISME DE L'ECOULEMENT SUIVANT LA GEOMETRIE DE LA TREMIE	201
6.1.4 - TECHNIQUES D'EXPERIMENTATION	204
6.1.5 - PUISSANCE DU MOTEUR D'UN TAPIS EXTRACTEUR	205
6.1.6 - DISTRIBUTION DE VITESSE DANS UNE TREMIE DE DOSAGE	208
6.2 - PROPOSITION DE REGLES DE CHOIX DE LA GEOMETRIE D'UNE TREMIE DE DOSAGE DES GRANULATS	209
6.2.1 - DETERMINATION DES PROPRIETES D'ECOULEMENT DES MATERIAUX A DOSER	209
6.2.2 - CHOIX DU TYPE ET DE LA FORME DE LA TREMIE	212
6.2.3 - ETAPE PRIMAIRE OU INTERMEDIAIRE DANS LE CHOIX DES DIMENSIONS DE LA TREMIE	212
6.2.3.1 - GEOMETRIES CRITIQUES	212
6.2.3.2 - GEOMETRIE CHOISIE	217
6.2.4 - VALIDATION DU CHOIX AVEC LES CONTRAINTES D'EXPLOITATION	217
6.2.5 - DIMENSIONNEMENT DU DISPOSITIF DE DOSAGE	218
6.2.5.1 - GEOMETRIE AU NIVEAU DE LA SORTIE DU MATERIAU	218
6.2.5.2 - PUISSANCE DU MOTEUR D'UN DISPOSITIF DE DOSAGE	218
6.2.6 - DIMENSIONS DEFINITIVES DE LA TREMIE DE DOSAGE	218

6.3 - PRISE EN COMPTE DES PHASES TRANSITOIRES DE FONCTIONNEMENT	219
6.3.1 - MECANISME DE L'ECOULEMENT DANS UNE TREMIE EN CHANTIER	219
6.3.2 - CONSIDERATION DE LA PHASE INITIALE DE L'ECOULEMENT - MODELE 2	219
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE	223
BIBLIOGRAPHIE	227
ANNEXES	
ANNEXE A - DETERMINATION DES EFFORTS MOBILISES DANS LA ZONE D'EXTRACTION	1
A.1 - NOTATIONS ET DEFINITIONS	3
A.2 - DETERMINATION DE LA CHARGE EXERCEE PAR LE CONTENU DE LA TREMIE	7
A.3 - DETERMINATION DE LA FORCE DE FROTTEMENT SUR LES JOUES LATERALES	9
A.4 - DETERMINATION DU POIDS DU MATERIAU ENTRE LE TAPIS ET LE PLAN DE RUPTURE	11
ANNEXE B - RESULTATS COMPLEMENTAIRES SUR LA PREDICTION DES DIMENSIONS	13
ANNEXE C	19
C.1 - QUELQUES RESULTATS DES ESSAIS TRIAXIAUX	21
C.2 - TECHNIQUE DE L'ANALYSE FACTORIELLE EN COMPOSANTE PRINCIPALE	27
C.2.1 - GENERALITES SUR L'ANALYSE DES DONNEES	27
C.2.2 - L'ANALYSE FACTORIELLE EN COMPOSANTE PRINCIPALE	27
ANNEXE D	29
D.1 - TECHNIQUE DE LA DETECTION DU RAYONNEMENT GAMMA	31
D.1.1 - ACTIVITE D'UNE SUBSTANCE RADIOACTIVE	31
D.1.2 - INTERACTION DU RAYONNEMENT GAMMA AVEC LA MATIERE	31
D.1.3 - PRINCIPE DE LA DETECTION DU RAYONNEMENT GAMMA	33
D.2 - PLANS D'EXPERIENCE	35

ANNEXE E	39
E.1 - LA CENTRIFUGEUSE	41
<i>E.1.1 - JUSTIFICATION ET PRINCIPE DES ESSAIS EN CENTRIFUGEUSE</i>	41
<i>E.1.2 - CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE LA CENTRIFUGEUSE</i>	43
E.2 - EXPERIMENTATIONS EN CENTRIFUGEUSE	44
<i>E.2.1 - PLAN D'EXPERIENCE</i>	44
<i>E.2.2 - RESULTAT DU TRAITEMENT DES ENREGISTREMENTS DES PESONS</i>	49
<i>E.2.3 - ETALONNAGE DU CAPTEUR DE VITESSE DU TAPIS</i>	50

RESUME

La possibilité de doser correctement les granulats dépend de la maîtrise de leur écoulement dans la trémie doseuse. Or certains matériaux d'usage courant posent des problèmes dûs notamment à leur tendance au colmatage et souvent à la non prise en compte de leurs propriétés d'écoulement lors de la conception du matériel de dosage.

Une approche théorique de l'écoulement en vue du dosage a été élaborée. Elle permet de décrire, formuler et prévoir les phénomènes d'écoulement en masse, de voûte stable et de formation de cheminée en fonction des caractéristiques du matériau et de la trémie.

Des expérimentations ont été réalisées avec des trémies réelles en utilisant le marquage par traceur radioactif et avec un modèle réduit à géométrie variable en centrifugeuse. Une caractérisation des matériaux granulaires utilisés vis à vis de leur aptitude à l'écoulement a été recherchée.

A l'issue des confrontations des études bibliographique, théorique et expérimentales, une règle de choix de la géométrie d'une trémie de dosage des granulats, en fonction de leurs propriétés d'écoulement, est proposée.

NOTATIONS

La liste dressée ci-dessous concerne essentiellement les notations qui sont souvent employées dans le texte sans avoir à rappeler à chaque fois leurs définitions. Ainsi certains symboles définis localement n'y figurent pas.

1 - SYMBOLES

A - ALPHABET FRANCAIS MINUSCULE

$a (a_r, a_\theta, a_\varphi)$	accélération dans le système (r, θ, φ)
c	cohésion
$d_{\max}$	taille maximale des grains
e	épaisseur de veine de matériau sur le tapis
$f(\theta)$	fonction de distribution de vitesse
ff	facteur d'écoulement (Cf 1.2.2.1.i)
f_m	fonction définie par la formule (2.48) du chapitre 2
f_v	fonction définie par la formule (2.47) du chapitre 2
g	accélération de la pesanteur
h	hauteur de matériau dans la trémie
$h_1(u), h_2(u)$	termes définis dans la formule (2.26) du chapitre 2
k	$= (1 + \sin\varphi_e) / (1 - \sin\varphi_e)$
l	épaisseur de la trémie lorsqu'elle est bidimensionnelle
m	facteur introduisant la dimension de l'écoulement : = 0 pour un écoulement plan symétrique = 1 pour un écoulement axisymétrique
n	coefficient défini dans la formule (2.24)
q	débit d'écoulement pendant le dosage

r	coordonnée radiale dans le système (r, θ, φ)
r_o, r_1	coordonnées radiales respectivement au niveau de la sortie et à la surface libre du matériau (Cf. fig 2.1 chap 2)
t	temps
u	$= r_o/r_1$ défini dans la formule (2.26) du chapitre 2
$v(v_r, v_\theta, v_\varphi)$	vitesse dans le système (r, θ, φ)
$v(v_x, v_y, v_z)$	vitesse dans le système (x, y, z)
v_t	vitesse du tapis
w	teneur en eau
x, y, z	coordonnées spatiales

B - ALPHABET FRANCAIS MAJUSCULE

A	ouverture de trappe
D	dimension à la base d'une trémie (dans le sens de l'évacuation du matériau)
D_{ch}	ouverture de la cheminée initiale à la base de la trémie
D_g	dimension minimale à la base d'une trémie pour la formation de voûte de type "géométrique"
D_m	dimension critique à la base d'une trémie pour l'écoulement en masse
D_v	dimension critique à la base d'une trémie pour la formation de voûte stable
E_s	énergie spécifique
FF	fonction d'écoulement (Cf. 1.2.2.1.h - Chapitre 1)
J	$= \int_0^{\theta_p} \cos^{\frac{1}{2}} \theta \, d\theta$ (Cf formule (2.40) du chapitre 2)
N	facteur d'échelle pour l'accélération artificielle en centrifugeuse (Cf. tableau 5.1 chap 5)
P, P_1, P_2, P_a	voir formules (2.22) (2.21) et (2.25) du chapitre 2
Q	débit d'écoulement pour une vidange simple
S	section utile de matériau sur le tapis doseur

V	volume de matériau
X, X_1, X_2, X_a	définis par les formules (2.22) (2.21) et (2.25) du chapitre 2
Y, Y_1, Y_a	définis par les formules (2.22) (2.21) et (2.25) du chapitre 2

C - ALPHABET GREC

α	inclinaison du tapis doseur par rapport à l'horizontale
γ	poids volumique vrac du matériau
γ	taux de cisaillement plastique
ϵ	vitesse de déformation plastique
θ	coordonnées angulaires dans le système (r, θ, φ)
θ_{ch}	angle d'inclinaison de la cheminée initiale par rapport à la verticale
θ_m	angle d'inclinaison de la paroi pour l'écoulement en masse critique (par rapport à la verticale)
θ_p	angle d'inclinaison de la paroi par rapport à la verticale
θ_v	angle d'inclinaison de la paroi pour la formation de voûte stable (par rapport à la verticale)
λ	défini dans la figure 2.11 du chapitre 2
μ	$= \pi/4 - \varphi/2$
μ_k	coefficient de frottement sur les parois latérales au niveau de la sortie
ν	obliquité de la contrainte (chapitre 2 fig 2.1)
ξ	coefficient de proportionnalité liant le débit massique, la vitesse du tapis et la section de veine de matériau sur le tapis (Cf. formule (2.64) chapitre 2).
ρ	masse volumique vrac du matériau
σ	contrainte moyenne (parfois contrainte normale)
σ_a	contrainte moyenne axiale à la base de la trémie
σ_c	stabilité du matériau (résistance à la compression d'un obstacle tel qu'une voûte stable ou une cheminée stable)
σ_h	contrainte horizontale

σ_p	contrainte moyenne à la paroi et à la base d'une trémie
σ_v	contrainte verticale
σ_0	$= \sigma_0(\theta)$ = répartition de la contrainte moyenne à la base de la trémie
σ_1	contrainte principale majeure
σ_2	contrainte principale mineure
Σ_1, Σ_2	voir fig 2.11.b chapitre 2
τ	contrainte tangentielle
φ	angle de frottement interne
φ_e	angle de frottement interne effectif (Cf 1.2.2.1)
φ_i	angle de frottement interne initial (Cf 1.2.2.1)
φ_M	angle de frottement maximal mobilisable sur une paroi pendant l'écoulement (Cf formule (2.49) chapitre 2)
φ_p	angle de frottement à la paroi
φ_t	angle de frottement matériau-tapis (chapitre 2)
φ_{te}	angle de frottement effectif matériau-tapis (Cf. fig 2.11.a chapitre 2)
ϕ	angle entre la direction radiale et la direction de la contrainte principale majeure
ϕ_a, ϕ_p	valeurs de ϕ respectivement sur l'axe central et sur la paroi
ω	évasement à la sortie du matériau (Fig 2.11.b chapitre 2)
Ω	taux d'expansion de volume

2 - ABREVIATIONS

Pour le chapitre 3 les abréviations sont définies au début de la partie "analyse des résultats"

S.R.	Sable roulé de Loire 0/4
S.B.	Sable broyé de Loire 0/2
S.C.2	Sable broyé calcaire 0/2
S.C.6	Sable broyé calcaire 0/6
C.V.	Cendres volantes

INTRODUCTION

Les matériaux en vrac, c'est-à-dire les matériaux granulaires et les particules solides sont produits ou utilisés dans plusieurs domaines tels que les industries chimiques, pharmaceutiques et métallurgiques, l'agro-alimentaire et le génie civil. Le fonctionnement du centre de production dépend généralement de la possibilité de stocker, doser et transporter ces matériaux et par conséquent de la qualité des matériels utilisés pour effectuer ces opérations. La recherche incessante d'une qualité de production meilleure associée à une bonne rentabilité ainsi que l'avance vers l'automatisation incitent la plupart des industriels à concevoir ces matériels de façon à ce qu'ils se conjuguent harmonieusement avec le reste de l'installation. Mais cette démarche est parsemée de problèmes liés tant à la diversité des produits en vrac qu'à la complexité de leurs comportements rhéologiques. Ces derniers demeurent mal connus en dépit de nombreuses recherches entreprises pour les définir.

En ce qui concerne les matériels de stockage (silos) et de dosage (trémies) les problèmes qui se posent sont essentiellement liés aux comportements et aux propriétés à l'écoulement des matériaux à manipuler. En effet un bon matériel doit :

- avoir une bonne résistance vis-à-vis non seulement des pressions statiques mais aussi des pressions dynamiques ainsi que des chocs d'impacts et dépressions causés par l'effondrement de voûtes et cheminées stables.
- avoir une configuration adéquate qui permet d'éviter les phénomènes préjudiciables à l'écoulement du produit en particulier les formations de voûte et cheminée stables, de maîtriser ainsi le débit de matière et d'assurer un dosage exact.

Ces deux conditions signifient qu'une bonne connaissance du comportement et des propriétés à l'écoulement du matériau est indispensable.

Notre étude s'intéresse principalement au dosage des granulats. Elle entre dans le cadre du contrôle et de l'amélioration des conditions de fonctionnement des centrales de fabrication de matériaux de chaussées afin d'obtenir un produit de composition régulière et conforme à la formulation recherchée. La trémie de dosage des granulats installée dans la chaîne de production doit notamment satisfaire la deuxième condition formulée ci-dessus. Or il s'avère que certains matériaux d'usage courant tels que sable humide à forte teneur en fines et cendres volantes humides posent des problèmes en raison de leur tendance au colmatage. Nous voilà donc confrontés avant tout à des problèmes d'écoulement de ces matériaux dans l'organe de dosage avec comme objectif l'élaboration de critères de dimensionnement géométrique d'une trémie doseuse en fonction de leurs caractéristiques.

Notre démarche s'appuie sur le raisonnement ci-après. Les phénomènes d'écoulement ainsi que les problèmes qui y concourent dépendent non seulement des caractéristiques du matériau mais également des paramètres liés à la géométrie de la trémie et parfois à l'environnement. Il est donc possible pour un matériau donné de choisir une configuration optimale de la trémie c'est-à-dire celle qui utilise au mieux l'énergie de gravité et permet ainsi d'éviter ou minimiser les problèmes. D'ailleurs bon nombre de ces derniers, rencontrés dans la pratique, résultent d'une géométrie de

trémie non adaptée aux conditions d'écoulement du produit. Dans ce cas les dispositifs d'aide (vibreurs, moyens mécaniques, moyens pneumatiques, etc...) mis au point pour faciliter l'écoulement d'un produit difficile seraient plutôt utilisés pour résoudre une mauvaise conception si bien que leurs efficacités sont limitées pour un coût parfois élevé.

L'étude commence dans le chapitre 1 par une analyse bibliographique afin d'en dégager des directives. En effet de nombreux travaux ont été effectués dans le cadre de l'étude de l'écoulement des matériaux granulaires avec plus ou moins de succès quoique jusqu'à présent il n'existe pas de théorie qui donne entière satisfaction quant à son efficacité à régir le phénomène et à résoudre les problèmes inhérents à celui-ci.

En grande partie les études antérieures portent sur la détermination des efforts exercés par le matériau sur les parois du matériel de stockage pour le dimensionner en conséquence. L'approche théorique de l'écoulement, mise au point au chapitre 2, étudie les phénomènes d'écoulement en masse, de formation de voûte stable et de formation de cheminée en vue d'une application au dimensionnement géométrique d'une trémie de dosage des granulats.

L'étude de l'écoulement et par conséquent la conception d'un matériel de dosage nécessite une bonne connaissance des produits à manipuler. Ainsi le chapitre 3 est consacré à l'analyse des caractéristiques des matériaux que nous avons utilisés pendant les essais d'écoulement, afin d'en dégager les paramètres importants.

Pour comprendre le mécanisme de l'écoulement dans les conditions réelles de chantier des expérimentations ont été réalisées avec deux types de trémies réelles en utilisant une méthode de marquage par traceur radioactif sur différents niveaux dans la trémie. On effectue aussi une mesure par gammadensimétrie de la densité de matériau à la base de celle-ci. Les techniques d'exploitation des mesures explicitées au chapitre 4 permettent de visualiser le mode d'écoulement et de comparer les matériaux ainsi que les trémies utilisées.

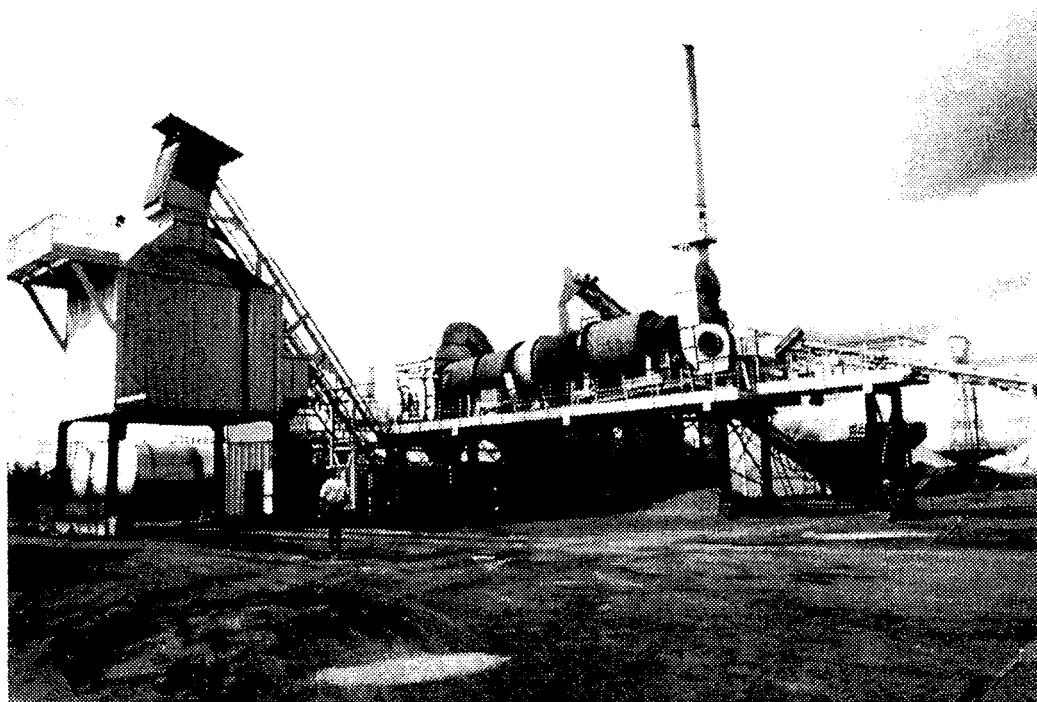
La lourdeur des essais en trémies réelles ne permettent pas d'étudier plusieurs configurations, étude nécessaire pour mettre en évidence les différents modes d'écoulement et aussi pour tester la pertinence de l'approche théorique établie au chapitre 2. Ainsi les expérimentations ont été poursuivies en centrifugeuse avec une trémie à géométrie variable. La centrifugeuse permet de recréer dans le modèle réduit les mêmes contraintes et déformations que dans l'ouvrage réel en agissant sur l'accélération artificielle. Une méthode de marquage par points colorés sur différents niveaux associée à une technique de traitement numérique d'image a été adoptée. L'étude en centrifugeuse fait l'objet du chapitre 5.

A la suite des confrontations des études bibliographique, théorique et expérimentales, une règle de choix de la géométrie d'une trémie de dosage des granulats en fonction de leurs propriétés d'écoulement est proposée au chapitre 6.

En conclusion, nous dégageons les principaux apports de ce travail ainsi que les perspectives d'avenir intéressantes.

CHAPITRE 1

PRINCIPAUX ELEMENTS DE LA BIBLIOGRAPHIE



1.1 - DOSAGE DES MATERIAUX GRANULAIRES DANS LES CENTRALES DE FABRICATION

L'étude du dosage des matériaux granulaires entre dans le cadre du contrôle et de l'amélioration des conditions de fonctionnement des centrales de fabrication des matériaux de chaussées afin d'obtenir un produit de composition régulière et conforme à la formulation recherchée.

1.1.1 - STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DES CENTRALES DE FABRICATION [8]

1.1.1.1 - *STRUCTURE*

Une centrale de fabrication se compose de plusieurs matériels qui permettent de doser les différents matériaux constituant le produit fini. Elle comporte généralement :

- des doseurs (et parfois prédoseurs) à granulats, qui intéressent particulièrement notre étude, pour le dosage des matériaux granulaires tels que gravillons, sables, laitiers etc... et des matériaux fins humides tels que les cendres volantes.
- Un doseur à pulvérulent pour le dosage des matériaux fins et secs tels que fines calcaires, ciment, chaux, cendres volantes sèches etc...
- Pour les centrales de fabrication de matériaux traités, aux liants hydrauliques (fig 1.1.a), un malaxeur situé à l'aval des doseurs.
- Pour les centrales de fabrication de matériaux traités aux liants hydrocarbonés (fig. 1.1.b)
 - . un tambour sécheur situé à l'aval des doseurs
 - . ensuite une pompe à bitume pour le dosage du liant introduit dans le tambour sécheur enrobeur ou le malaxeur.

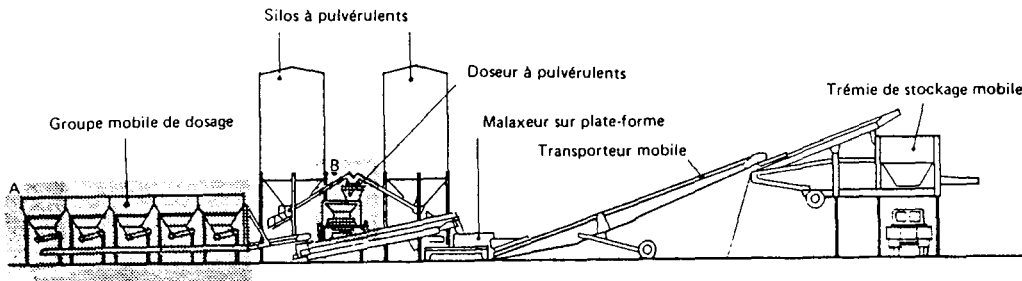
Il existe d'autres éléments annexes tels que la trémie de stockage des enrobés à chaud, le dépoussiéreur des gaz de séchage afin de récupérer les fines entraînées et limiter ainsi la pollution de l'environnement.

1.1.1.2 - *FONCTIONNEMENT*

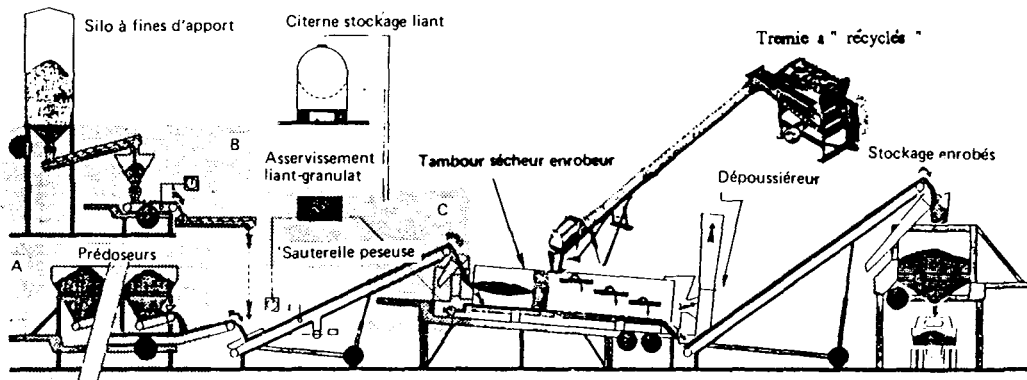
Selon le mode de fonctionnement, deux types de centrales se distinguent :

- Les centrales discontinues dont le malaxage se réalise par gâchées successives permettant ainsi la fabrication de nombreuses formules de produits. L'exploitation se fait souvent en poste fixe à cause de leur structure parfois complexe et lourde.
- Les centrales continues où un flot ininterrompu de matériau traverse le malaxeur. Souvent elles fabriquent une seule formule de produit à fort débit et leurs conceptions permettent de les déplacer facilement.

Figure 1.1 - Types de centrales de fabrication



a) centrale classique continue pour matériaux traités aux liants hydrauliques



b) centrale tambour-sécheur-enrobeur pour matériaux traités aux liants hydrocarbonés.

Pendant la fabrication, dans une centrale continue, les différents éléments qui la composent doivent fonctionner harmonieusement afin d'obtenir un produit de composition constante ou du moins variant à l'intérieur d'une certaine tolérance. Cela nécessite un poste de conduite et, un système qui permet de conjuguer les débits des différents constituants. Les centrales bénéficient actuellement du développement de l'électronique et évoluent vers l'automatisme grâce à un système d'asservissement des différentes fonctions entre elles. Néanmoins des problèmes se posent encore notamment :

- Du point de vue de la tenue des appareils électroniques aux procédures de réglage et d'étalonnage.
- Du point de vue asservissement lorsque se produisent des variations importantes et fréquentes de débit.

Cela peut arriver lorsque les granulats ou les fines s'écoulent mal d'où notre objectif de concevoir avant tout de bons matériels de dosage à granulats.

1.1.2 - STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DES DOSEURS A GRANULATS [89]

1.1.2.1 - STRUCTURE

Les matériels de dosage en continu des produits en vrac se composent généralement d'une trémie, de forme couramment tronconique ou pyramidale, équipée à sa base d'un dispositif de dosage qui permet de recueillir et évacuer le matériau à un débit donné. Pour le dosage des matériaux granulaires en centrale de fabrication on utilise généralement des distributeurs à courroie (ou tapis). Suivant le mode de réception du matériau à la base deux types de trémies doseuses se distinguent :

- La trémie à écoulement (fig. 4.6 - Chap 4) pour laquelle le matériau s'écoule naturellement à travers la base en forme de bec. Le contenu de la trémie ne charge pas le tapis. La vitesse de ce dernier régularise le débit en ralentissant l'écoulement naturel.
- La trémie à extraction (fig. 4.5 - Chap 4) pour laquelle le matériau stocké charge l'arrière du tapis. Par avancement de celui-ci il y a cisaillement et extraction du matériau.

Il convient de signaler qu'il existe plusieurs types de dispositifs de dosage (Cf. [11]) selon la nature du matériau : nature pétrographique, granularité et plus grande dimension, pourcentage d'humidité et caractéristiques particulières (chaude, collante etc...). En particulier pour le dosage des pulvérulents secs dans les centrales de fabrication on utilise plutôt les extracteurs à vis ou à alvéolaires.

1.1.2.2 - FONCTIONNEMENT

a. Fonctionnement en volumétrie

Le tapis tourne à vitesse V_t pour un débit fixé . L'expérience des utilisateurs montre que ce dernier est proportionnel à la section utile S entre les joues de guidage et à la vitesse du tapis V_t dans une plage où celle-ci ne doit pas être ni trop faible (> 0.05 m/s sinon le matériau tend à se distribuer par paquet) ni trop forte (< 0.36 m/s sinon le débit ne peut pas être proportionnel à la vitesse). L'utilisation d'un linéarisateur électronique permet d'atteindre 0.66 m/s sous certaines conditions.

Le dosage en volumétrie délivre un débit volumique relativement constant mais ne tient pas en compte les variations de l'épaisseur de veine, de la teneur en eau, de la densité apparente et par conséquent ne peut fournir un débit massique constant sauf avec des matériaux sans fines.

b. Fonctionnement en contrôle pondéral

Le doseur fonctionne en volumétrie mais comporte en plus des appareils qui permettent de contrôler le poids en continu et mesurer la vitesse du tapis et de savoir par conséquent les circonstances qui nécessitent des interventions.

c. Fonctionnement en pondéral (ou en autorégulation pondérale)

Le dosage en pondéral consiste à conserver le débit masse PV_t constant. Le doseur comporte un appareil, constitué généralement de pesons à jauge, qui mesure la charge P au tapis et un appareil qui mesure la vitesse V_t de celui-ci (dynamo tachymétrique, alternateur ou roue codeuse...). Possédant ces deux informations la régulation pondérale $PV_t = \text{cte}$ s'effectue soit en alimentant les pesons par une tension proportionnelle à la vitesse, soit en utilisant un multiplicateur électronique. Il existe aussi des systèmes qui permettent de réguler avec l'ouverture de la trappe. Pour le cas des pulvérulents secs, le débit massique d'un doseur à vis ou à alvéolaire vaut le produit du poids, qu'il délivre par tour, par la vitesse en tour/min.

1.1.3 - MODES D'ÉCOULEMENT EN TRÉMIE

De la façon dont les matériaux s'écoulent dans une trémie on distingue généralement deux types d'écoulement :

1.1.3.1 - ÉCOULEMENT EN MASSE

Lors de l'écoulement en masse il y a mouvement d'ensemble de tout le contenu de la trémie (fig. 1.2.a), assurant ainsi le minimum de ségrégation et l'uniformité du débit de matière à la sortie. Ce mode d'écoulement se produit lorsque les parois sont lisses et de pente forte. Il est recommandé pour le dosage des produits difficiles.

1.1.3.2 - ÉCOULEMENT EN CHEMINÉE OU A NOYAU

L'écoulement en cheminée se produit généralement dans les trémies de parois rugueuses et de pente faible. La vidange commence par la formation d'une cheminée à travers laquelle vont ensuite s'écouler les produits venant des côtés (fig. 1.2.b et photo 1.1). Le fait que la trémie possède suffisamment de capacité volumique constitue un avantage considérable mais vu les problèmes évoqués au 1.1.4. ce type d'écoulement convient seulement aux matériaux à écoulement facile.

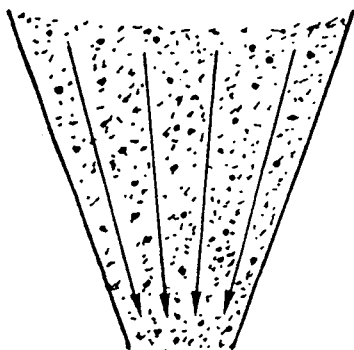
1.1.4 - PROBLÈMES DE DOSAGE

Il s'agit principalement de problèmes d'écoulement. Ceux-ci dépendent du matériel de dosage (Cf. 1.1.5.1) et des propriétés d'écoulement des matériaux. Par conséquent, il faut en tenir compte lors de la conception du doseur.

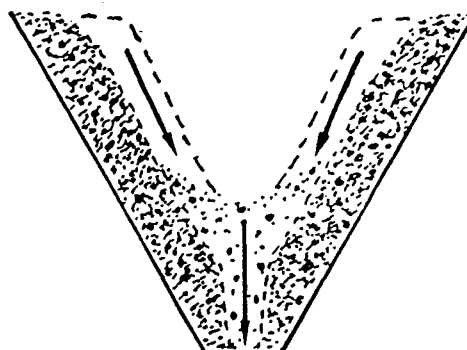
1.1.4.1 - FORMATION DE VOÛTE

L'écoulement s'interrompt par suite de la formation d'un bloc rigide et stable, souvent en forme de voûte, au dessus de l'orifice de sortie ou de l'extracteur. La résistance de la voûte résulte des forces de cohésion développées entre les grains. Pour les matériaux grossiers la voûte dite "géométrique" résulte de l'enchevêtrement des grains.

Figure 1.2 - Modes d'écoulement en trémie



a) écoulement en masse



b) écoulement en cheminée



Photo 1.1 - Ecoulement en cheminée

1.1.4.2 - STABILISATION DE LA CHEMINEE

Au début de l'écoulement une cheminée se forme, ensuite les grains de dessus passent à travers celle-ci. On assiste parfois à une stabilisation et plus rien ne s'écoule. Ainsi lors d'un fonctionnement en continu, une zone morte se crée autour de la cheminée. Dans les silos l'extraction des matériaux situés dans les zones stagnantes posent d'énormes problèmes si, pendant une longue période de stockage, ils se consolident ou se dégradent.

1.1.4.3 - LE FUSAGE

Le fusage concerne les matériaux fins et secs tels que les cendres volantes. Lors de la rupture d'une voûte ou d'une cheminée stable, il arrive que les particules fines déplacent tant d'air qu'elles se comportent comme un fluide. Le produit, fluidisé, déferle alors d'un coup et déborde de façon incontrôlable sur le dispositif de dosage..

1.1.4.4 - ECOULEMENT IRRÉGULIER

L'irrégularité provient parfois d'une alternance entre formation de voûte ou de cheminée et chute de matières, autrement dit : les grains observent un temps de rétention avant de s'écouler. L'irrégularité peut aussi résulter d'une mauvaise conception du doseur où l'écoulement ne s'effectue que très partiellement (Cf. 1.1.5.1). Dans ces conditions un dosage en continu devient impossible.

Il existe d'autres problèmes de dosage liés aux conditions de stockage du matériau avant le dosage tels que les variations de la teneur en eau, de la densité apparente, de la granulométrie et des problèmes liés aux appareils de contrôle du débit. Comme ils ne dépendent pas de la conception du doseur (volumétrique) nous les mettons au second plan.

1.1.5 - AIDE A L'ECOULEMENT DES MATERIAUX VRACS

1.1.5.1 - CONCEPTION ADEQUATE DU SYSTEME D'EXTRACTION

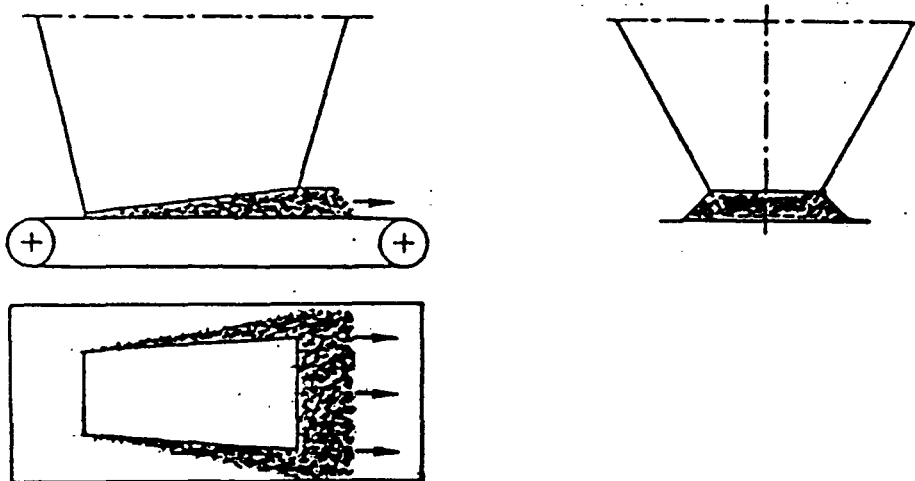
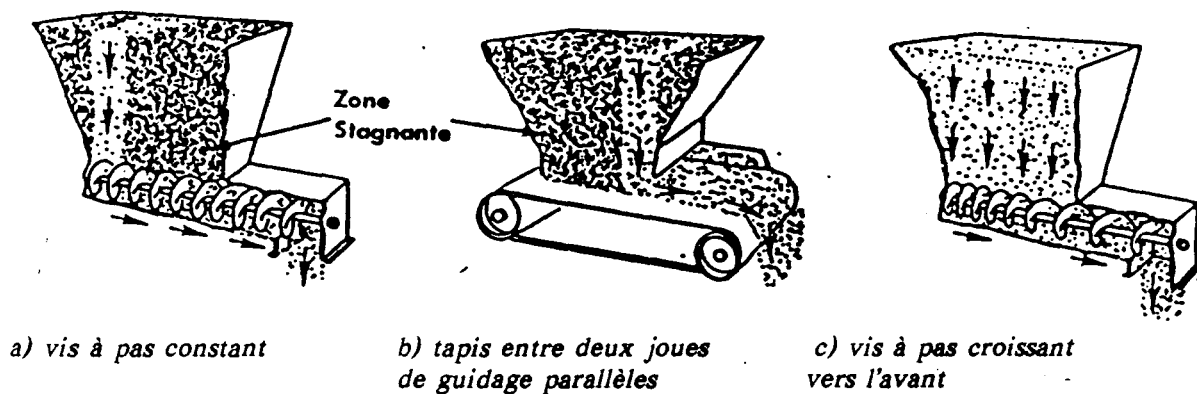
Parfois le dispositif de dosage joue aussi le rôle d'extracteur donc il contribue à l'évacuation du matériau et par conséquent il influe sur le mode d'écoulement dans la trémie. Un système d'extraction mal conçu peut alors causer des problèmes bien que la trémie soit correctement dimensionnée. Les figures (1.3) établies selon les observations de certains auteurs [5, 46] montrent comment l'extracteur agit sur le mode d'écoulement. Un distributeur à vis à pas constant (fig. 1.3.a) extrait généralement vers l'arrière de la trémie tandis qu'un distributeur à courroie serrée entre deux joues de guidage parallèles (fig. 1.3.b) extrait généralement vers l'avant. Ces écoulements partiels peuvent se traduire par une irrégularité voire s'interrompre à cause de la stabilisation de la zone stagnante. Pour les ouvertures rectangulaires, il convient alors d'accroître la zone d'extraction vers la sortie (fig. 1.3.c,d) pour augmenter la zone d'écoulement dans la trémie. Pour les ouvertures carrées et circulaires un tube long d'environ un diamètre connecte généralement la trémie et le dispositif de dosage. Par ailleurs ce dernier doit être doté d'une puissance suffisante pour vaincre la charge exercée par le matériau et pouvoir l'extraire. Signalons que la présence de coins morts au niveau de la sortie diminue l'efficacité de l'extracteur [71].

En récapitulant, une bonne conception de l'ensemble indépendant "trémie - dispositif de dosage" constitue le premier pas pour favoriser l'écoulement.

1.1.5.2 - EQUIPEMENTS ANNEXES

Parfois la configuration de la trémie, déterminée en vue d'une vidange gravitaire, ne s'accorde pas aux conditions de transport et d'exploitation (dépassement de l'encombrement maximal, ouverture trop large pour le dispositif de dosage, dimension trop petite par rapport à celle de la pelle du chargeur,...). Parfois aussi la même trémie sert pour le dosage de matériaux de granulométries et de propriétés d'écoulement différentes. Dans ces cas il y a lieu de modifier la configuration idéale de la trémie et la munir d'un équipement pour se parer des éventuelles difficultés d'écoulement (et non pour résoudre des problèmes dus à une mauvaise conception!). Plusieurs techniques existent dont les plus sophistiquées ont été réalisées pour la vidange des grands silos mais aucune ne fait l'unanimité quant à l'efficacité, tellement les produits en vrac sont variés.

Figure 1.3 - Dispositifs de dosage



d) Zone d'extraction croissante vers l'avant

a. Moyens mécaniques

Selon l'usage il existe :

- Des équipements destinés à favoriser l'écoulement tels que :

- . le démotteur, une grille métallique installée en haut de la trémie, qui casse les mottes lors du remplissage ;

- . le "VE de décharge", un dispositif installé à l'intérieur de la trémie pour empêcher la formation de voûte et régulariser l'écoulement à condition de la placer à un niveau optimal. Nous l'avons testé dans le cadre des expérimentations sur modèles réels (Cf. Chap 4 et fig. 4.7) .

- . les extracteurs mécaniques, en particulier l'extracteur à vis; installés à la base des trémies. Ils ne garantissent pas toujours contre la formation de voûte au-dessus de la zone d'extraction ;

- . le revêtement de paroi afin de la rendre plus lisse.

- Des équipements qui servent à enrayer les voûtes et les cheminées stables tels que le dévoûteur (fig. 1.4.a) dont la technique consiste à faire tourner dans le matériau un axe porteur de bras, disposés en étoiles sur son pourtour, à l'endroit où se maintient la voûte ou la cheminée. Bien que ce système fonctionne avec presque tous les produits, ses inconvénients sont la forte consommation d'énergie, l'usure et l'inaccessibilité en cas de panne en trémie pleine.

b. Les vibrations

Les vibrations constituent les moyens les plus utilisés pour résoudre les problèmes d'écoulement en trémie sans doute à cause de leurs coûts relativement faibles et de leur facilité d'installation, et aussi en raison de la sensibilité des matériaux à la vibration. En effet trois paramètres, la distribution granulométrique, la densité et l'humidité jouent des rôles prépondérants dans l'aptitude du matériau à se compacter. Et suivant les valeurs de ces paramètres, la vibration peut provoquer aussi bien la dilatation volumique que le compactage du produit (néfaste à l'écoulement) Des expériences réalisées dans certains travaux [5, 38] montrent que la vibration, correctement appliquée, diminue le frottement matériau-paroi et favorise la valeur de la fonction d'écoulement du matériau (Cf. 1.2.2.3). Dans la pratique il existe deux manières d'appliquer la vibration :

- vibration par la paroi de la trémie : dans ce cas, il faut certes une bonne connaissance du produit mais également de l'enceinte qui transmet la vibration. Le système "trémie + matière" doit entrer en résonance moyennant quoi il faut connaître sa fréquence propre suivant le niveau du matériau. Sur ce dernier point, beaucoup d'études restent encore à développer mais l'expérience des utilisateurs a permis de dégager les principes suivants [22] :

- . basse fréquence, grande amplitude : pour la destruction des voûtes se formant dans des produits secs et non collants mais à forte cohésion ;

- . moyenne fréquence, faible amplitude pour créer de bonnes conditions d'écoulement le long des parois d'une trémie, dans des matériaux compacts et fins avec une tendance hygroscopique ;

- . haute fréquence, faible amplitude pour maintenir la propreté des parois de trémies ;

- . le vibreur ne doit être actionné qu'après l'ouverture de l'orifice de sortie
- . le vibreur est placé à l'endroit où les voûtes ont tendance à se former, en règle générale au quart de la longueur de la pente partant du bas.

- vibration de l'unique matériau : à cause de la difficulté de transmettre par la paroi une vibration uniforme dans le matériau, la mise au point de dispositifs qui ne vibrent que celui-ci, s'est développée ces dernières années. Parmi ces dispositifs figure le HOGAN [76] (fig. 1.4.b) une sous-structure à connecter à la base d'une trémie par des suspensions flexibles et une manche en caoutchouc. Il se compose d'un corps vibrant, qui lui-même comporte des lames métalliques à inclinaison variable, et d'une petite trémie de réception. Le réglage du débit se fait en variant l'inclinaison des lames par un système de commande. Le HOGAN permet alors d'effectuer un dosage pondéral. Comme il s'agit d'un matériel relativement nouveau, on en connaît peu sur les types de produits qui lui conviennent.

c. Moyens pneumatiques

- Casse-voûte (fig. 1.4.c)

La technique consiste à plaquer sur les parois de la trémie des membranes élastiques que l'on gonfle lorsqu'une voûte ou une cheminée se stabilise. La méthode s'avère assez simple et efficace sur un grand nombre de produits. Le principal inconvénient est la fragilité de la membrane et quelquefois lorsque la voûte résiste, le matériau se compacte davantage donc la situation s'aggrave.

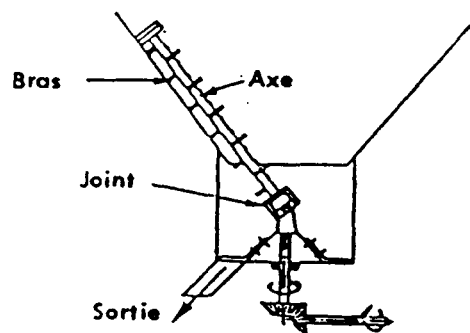
- Canon à air (fig. 1.4.d)

La technique consiste à libérer soudainement dans le matériau une certaine quantité d'air préalablement comprimée (pression ≈ 7 bars) dans un réservoir. L'onde mécano-acoustique résultant du choc brise la voûte ou la cheminée stable. L'importance de la zone d'action dépend de la taille du réservoir mais aussi de la densité et la cohésion de la matière. La méthode, d'installation facile, s'avère efficace sur pratiquement tous les produits (allant du pulvérulent au brut de concassage) et sert de dernier recours à des problèmes inextricables. Mais il faut libérer la quantité d'énergie juste suffisante car l'excès peut endommager le matériel ou causer un déferlement incontrôlable de produit.

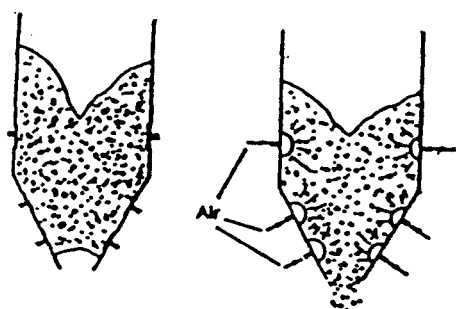
- Fluidisation

Il s'agit d'insuffler une certaine quantité d'air à basse pression dans le matériau afin de réduire les efforts de cohésion et de frottement entre les particules de sorte que le matériau acquiert un comportement proche de celui d'un fluide. La méthode ne marche qu'avec les produits pulvérulents secs de taille inférieure à 300 μm . L'excès d'air peut causer un déferlement de produit.

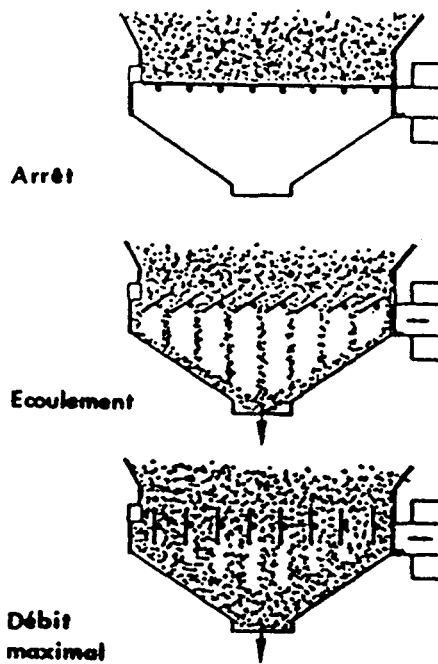
Figure 1.4 - Dispositifs d'aide à l'écoulement des produits en vrac [76]



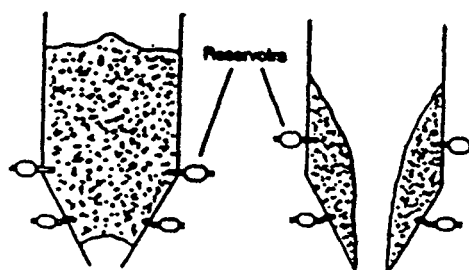
a) déviateur



c) Casse-voûte



b) HOGAN



d) Canon à air

1.2 - COMPORTEMENT DES MATERIAUX ET PROPRIETES D'ECOULEMENT

1.2.1 - COMPORTEMENT DES MATERIAUX PENDANT L'ECOULEMENT

Les matériaux granulaires se composent généralement de particules discrètes de formes, dimensions et orientations différentes. L'étude de leur comportement concerne de nombreux domaines (Génie civil, Agro-alimentaire, Industries pharmaceutiques etc...) et fait l'objet de divers approches théoriques, ne serait-ce que vis-à-vis du phénomène d'écoulement, et ce avec plus ou moins de succès.

1.2.1.1 - MATERIAU GRANULAIRE EN TANT QUE CONTINUUM

1.2.1.1.1 - APPROCHE PAR LA MECANIQUE DES FLUIDES

Le terme "écoulement" conféré aux fluides en mouvement indique intuitivement que dans cet état ceux-ci s'apparentent aux fluides. En réalité ils se distinguent aussi bien par leurs aspects macroscopiques (continu pour les fluides et discrète pour les matériaux granulaires) que par leurs comportements intrinsèques : le phénomène de cisaillement qui prédomine généralement dans l'écoulement des grains est pratiquement négligeable dans celui des fluides. Malgré les différents points qui séparent les deux milieux des tentatives de rapprochement ont été entreprises pour établir une théorie sur l'écoulement des matériaux granulaires. Ainsi BROWN et RICHARD [13, 14] modélisaient le débit d'écoulement des matériaux granulaires lors d'une vidange simple en utilisant une équation de type BERNOULLI (Cf. 1.4.2.4). En outre, pour établir son modèle turbulent pour l'écoulement rapide des matériaux granulaires, SHAHINPOOR et AHMADI (Cf. [2]) ont introduit une similarité entre un écoulement turbulent d'un fluide et les mouvements irréguliers et stochastiques des grains créés par les collisions interparticulaires. Par ailleurs il existe différents modèles de type hydraulique établis pour l'étude du mouvement des avalanches [58] de neige qui, en réalité, peut être considérée comme un continuum de grains.

1.2.1.1.2 - APPROCHE PAR LA THEORIE DU MILIEU EQUIVALENT CONTINU

Ces dernières années on assiste au développement d'une théorie généralisée pour le continuum des matériaux granulaires et équivalente de celle des milieux continus. Son application à l'étude du phénomène d'écoulement se limite pour l'instant à des cas simples d'écoulement rapide. Pour le cas de l'écoulement lent elle ne peut qu'aboutir à une forme plus générale du critère de COULOMB qui fait l'objet de la troisième approche ci-dessous.

a. Ecoulement lent - Ecoulement rapide

Pour la suite il semble utile de définir ces deux phénomènes. Afin de les illustrer, les auteurs se réfèrent souvent aux expériences effectuées par BAGNOLD [6] au cours desquelles il cisailait dans un anneau cylindrique un mélange constitué d'un liquide newtonien et de grains suspendus. Ces travaux de BAGNOLD, à l'origine du développement de plusieurs théories sur les mélanges, mettent en évidence deux régimes d'écoulement des matériaux granulaires considérés ainsi comme un biphasé :

- Ecoulement lent, gouverné essentiellement par les frottements interparticulaires, pour lequel les effets de l'inertie des grains sont faibles voire négligeables. Ce mode d'écoulement concerne particulièrement notre étude.
- Ecoulement rapide pour lequel les effets d'inertie des grains prédominent et le transfert de moment dû aux collisions des grains crée une composante non linéaire qui s'ajoute au phénomène de base.

b. Théorie généralisée du continuum des grains.

En 1971 GOODMAN et COWIN [30; 31] élaboraient une théorie généralisée pour les matériaux granulaires et basée sur des arguments formels de la mécanique des milieux continus. Cette théorie admet la nature polyphasique du milieu granulaire. Ainsi elle formule les effets de transfert de moment et d'énergie en vue de l'étude des mouvements rapides et comporte un processus thermodynamique pour régir les échanges avec la phase interstitielle. Le principal apport de ce travail est l'introduction d'une fonction de distribution de volume

$$v(x_1, x_2, x_3, t)$$

telle que la masse volumique vrac du matériau s'écrit

$$\rho = \rho_s v = \rho_s (1 - \varepsilon)$$

ρ_s étant la masse volumique d'un grain et $\varepsilon = \varepsilon(x_1, x_2, x_3, t)$ l'indice de vide ; les grains peuvent être compressibles ou non.

Cette étude, comportant quelques imperfections, a été rectifiée [18, 19, 44] et étendue plus tard par de nombreux auteurs. En particulier :

- pour l'étude des écoulements rapides des matériaux granulaires SAVAGE S.B [81] introduit le modèle de BAGNOLD [6, 7] et considère une similarité avec le comportement des fluides purement visco-anélastiques isotropes puis, par conséquent, détermine les équations constitutives du mouvement.
- AHMADI [2] introduit l'effet des rotations des grains en mouvement rapide.

En matière d'écoulement cette théorie généralisée concerne surtout les mouvements rapides et les applications se limitent pour l'instant à des problèmes bidimensionnels simples : écoulement sur un plan incliné et dans les canaux ouverts, écoulement plan de COUETTE [2, 81, 84]. Lorsqu'il s'agit de considérer un écoulement lent elle conduit à une forme plus générale du critère de COULOMB [30] et par conséquent rejoint les approches par la mécanique des sols.

1.2.1.1.3 - APPROCHE PAR LA MECANIQUE DES SOLS.

a. Comportement du matériau

En 1776 COULOMB [17] présentait la première loi de comportement des sols incluant les matériaux granulaires. Ensuite KÖTTER [49] a formulé les conditions de l'équilibre limite de MOHR-COULOMB ; son travail a été étendu et généralisé plus tard par SOKOLOVSKI [85]. La plupart des études portant sur le stockage et la vidange dans les silos et trémies des matériaux en vrac considèrent ceux-ci comme un matériau de COULOMB. Ils ont un comportement :

- élastique en statique [39]
- plastique en dynamique (plastique pour qu'il y ait déformation continue) et obéit au critère de l'équilibre limite de MOHR-COULOMB. L'état d'équilibre limite actif correspond au remplissage durant laquelle se produit une contraction verticale et l'état d'équilibre limite passif correspond à la vidange au cours de laquelle règne une contraction latérale.

Ces conditions permettent de déterminer l'état de contrainte dans le matériau. Il s'agit de calcul quasi-statique car on néglige généralement les effets d'inertie des grains. Usuellement les contraintes développées durant le remplissage sont définies comme contraintes statiques et celles qui s'exercent pendant l'écoulement comme contraintes dynamiques.

b. Règle d'écoulement associée

La détermination de la distribution de vitesse à partir de la connaissance de l'état de contrainte (donc à partir de la relation "contrainte-déformation") nécessite la définition d'une règle d'écoulement. Afin d'associer à l'état de contrainte un champ de vitesse cinématiquement admissible, DRUCKER et PRAGER [25, 26], se sont basés sur les travaux de HILL [32] sur l'élastoplasticité et ont postulé la règle d'écoulement associée. Cette dernière se traduit par une stabilité non - élastique du matériau à l'état plastique et conduit à la règle de normalité bien connue en plasticité. Elle a du succès pour les métaux qui obéissent au critère de TRESCA ($\varphi = 0$) mais pour les matériaux de COULOMB frottant ($\varphi \neq 0$) elle suscite des discussions. En effet, à partir du critère de COULOMB

$$F = \tau_{ns} - \sigma_{nn} \tan \varphi - c = 0$$

établi sur un plan (n,s) et de la relation

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = -v \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad (v \text{ constante positive})$$

donnant les vitesses de déformation,

on peut déterminer le taux de variation de volume:

$$\frac{1}{V} \frac{dV}{dt} = - (\dot{\epsilon}_{nn} + \dot{\epsilon}_{ss}) = \dot{\gamma}_{ns} \tan \phi \quad (1.1)$$

Si le matériau demeure complètement stable selon DRUCKER, le taux de cisaillement plastique $\dot{\gamma}_{ns}$ serait constant, de même pour le taux d'expansion de volume ($= \Omega$). Dans ce cas il y a accroissement exponentiel du volume avec le temps $V = V_0 \exp(\Omega t)$.

Cette situation est inacceptable car le matériau ne peut accroître indéfiniment son pourcentage de vide, ainsi elle met en doute la règle d'écoulement associée. Néanmoins celle-ci a été adoptée dans de nombreux travaux qui prennent pour le champ de vitesse les équations des caractéristiques de contrainte. La comparaison des équations des caractéristiques de contrainte établies au 1.3.1.4 et de celles de la vitesse établies au 1.4.1.1 montre pour la règle d'écoulement associée qu'il existe un angle $\Omega = \pm \phi/2$ entre les directions principales de contrainte et les directions principales de vitesse de déformation. Cette non-coaxialité a été prouvée par les travaux de DRESHER et De JOSSELIN de JONG [24].

c. Règle d'écoulement non-associée

Pour remédier aux problèmes de dilatation inadmissible rencontrée par la règle de DRUCKER, JENIKE [37] proposait la loi d'écoulement non-associée de l'incompressibilité. Il a montré qu'au début de l'écoulement le matériau se dilate jusqu'à un certain état critique de vide où la densité ne varie plus. Autrement dit le matériau devient incompressible pendant la phase d'écoulement stable. Sur le plan de MOHR (Cf 1.2.2.1 fig 1.5) la courbe intrinsèque ou lieu d'écoulement représente la phase initiale de dilatation qui vérifie la règle de normalité. Cette courbe se termine au point d'écoulement établi. JENIKE explique qu'en ce point la règle de normalité ne peut être appliquée car la direction de la vitesse de déformation ϵ n'est pas définie. Et ϵ possède suffisamment de degrés de liberté qu'aucune dilatation n'est finalement possible en écoulement établi. JENIKE admet de plus qu'il y a coaxialité entre les directions principales de contrainte et celle de déformation. Pour un matériau de COULOMB frottant ($\phi \neq 0$) le réseau des caractéristiques de vitesse (Cf 1.4.1.1) ne peut pas coïncider avec le réseau des lignes de glissement (Cf 1.3.1.4) compte-tenu des hypothèses d'incompressibilité ($\Delta V=0$) et de coaxialité ou isotropie ($\Omega=0$). Ils ne peuvent coïncider que si ces deux hypothèses sont prises l'une sans l'autre mais dans ces cas on est presque ramené à la règle d'écoulement associée. Cette controverse expose la règle de JENIKE à une incertitude. Mais W.G PARISEAU [68] qui a effectué une étude comparative des deux théories, a montré que la plasticité munie de la règle d'écoulement non-associée concorde mieux avec les résultats expérimentaux.

Certains auteurs dont nous-même attribuent à l'aide d'hypothèses complémentaires un champ de vitesse (radiale pour notre cas) au champ de contrainte sans avoir recours à certaines des hypothèses contraignantes discutées ci-dessus.

1.2.1.2 - MATERIAU GRANULAIRE EN TANT QUE MILIEU DISCRET

1.2.1.2.1 - APPROCHE PAR LA MECANIQUE STATISTIQUE

Le comportement du milieu granulaire est régi par un certain nombre de paramètres à aspect plus ou moins aléatoire suivant la complexité plus ou moins grande de la nature discrète des particules et la situation d'écoulement. Cela engendre une composante fluctuante à déterminer dans le mouvement. L'analyse commence alors par un traitement statistique probabiliste de ces paramètres, le matériau granulaire étant généralement considéré comme un arrangement de sphères identiques. Parmi les paramètres aléatoires figurent la porosité, les coordonnées spatiales de chaque sphère et les forces de contact entre elles. La meilleure estimation de certains paramètres s'obtient en faisant appel à des techniques telles que l'étude de la variance et la maximisation d'entropie [83] connue dans l'étude des arrangements des grains. Quant à l'évaluation de la force de contact plusieurs études [81] s'intéressent à la théorie cinétique, très connue pour l'étude des gaz, qui permet de modéliser les mouvements chaotiques individuels des particules par des fonctions qui décrivent les probabilités des événements (spatiaux et cinématiques). Ces études supposent généralement que l'écoulement peut être décrit par un événement qui implique une paire de particules : force de collision binaire (élastique ou inélastique). Force de collision sous-entend qu'il s'agit d'écoulement rapide dont le mécanisme dissipatif explique l'introduction d'équations impliquant l'énergie [2, 81]. Finalement la méthode convient pour le cas d'écoulement libre et rapide.

1.2.1.2.2 - APPROCHE PUREMENT CINEMATIQUE

L'approche purement cinématique considère que le champ de vitesse dans le matériau ne dépend pas de l'état de contrainte mais résulte d'effets cinématiques déclenchés par le processus suivant : sous l'effet de son poids propre un grain appartenant à une couche dans l'empilement glisse vers le bas lorsqu'il se crée une place vacante sur la couche sous-jacente ; ce grain libère à son tour une place qui accueillera un autre grain de la couche adjacente supérieure. Ce processus peut être interprété d'une manière probabiliste ou déterministe. Du côté probabiliste figurent les travaux de LITWINISZYN [56], MULLINS [66], MARSAL [59], KITAMURA [48] et CHIKWENDU [16] qui utilisent la théorie stochastique. Les travaux de TÜZÜN [90], NEDDERMAN et TÜZÜN [67] se situent plutôt du côté déterministe bien qu'ils découlent des idées de LITWINISZYN (Cf. 1.4.1.3)

1.2.1.2.3 - AUTRES APPROCHES

Il existe des modèles empiriques, tels que la fameuse formule de BEVERLOO [9] (Cf 1.4.2.6) pour le débit d'écoulement, établis à partir d'études paramétriques à base d'expérimentation. Des relations empiriques qui groupent des paramètres connus peuvent être obtenues par la technique de l'analyse dimensionnelle [47, 50].

Actuellement on assiste au développement de différentes techniques de simulation [4, 60] : physique, analytique, numérique.

Ces différentes méthodes peuvent fournir des idées dans l'interprétation des phénomènes et la détermination de nouvelles lois de comportement et permettent de se passer de certaines limitations dans les formulations théoriques.

1.2.2 - PROPRIETES D'ECOULEMENT DES MATERIAUX ET DE L'ENCEINTE

L'écoulement dans les trémies de dosage étant généralement lent, nous nous sommes intéressés aux théories issues de la mécanique des sols et en particulier aux études effectuées par JENIKE [37, 38]. Pour un matériau de COULOMB, l'écoulement peut être défini comme un processus de déformations plastiques où le phénomène de cisaillement joue un rôle prépondérant.

Les propriétés d'écoulement définies ci-après ont été déterminées à partir d'essais de cisaillement réalisés dans les conditions de sollicitation dans l'enceinte (silo, trémie) pendant l'écoulement.

1.2.2.1 - DEFINITION ET DETERMINATION DES PROPRIETES D'ECOULEMENT

a - Masse volumique vrac :

De ce paramètre dépend l'état de contrainte dans le matériau donc son aptitude à se compacter ou à s'écouler. Pour déterminer les paramètres qui suivent on prépare des échantillons portés à la même masse volumique ρ en appliquant une charge de précompression N_c .

b - Lieu d'écoulement - Angle de frottement interne initial.

Il existe une phase initiale de l'écoulement au cours de laquelle le matériau se dilate donc sa masse volumique diminue. Pour représenter cette phase sur le plan de MOHR (fig 1.5) on procède au cisaillement à la boîte des échantillons sous une charge normale N dont on augmente la valeur d'une éprouvette à l'autre sans dépasser N_c ($N < N_c$) afin que l'échantillon augmente de volume pendant le cisaillement. Les valeurs (σ_i, τ_i) obtenues dessinent une courbe appelée "lieu d'écoulement" du matériau. L'angle φ_i tel que $\tan \varphi_i = d\tau / d\sigma$ s'appelle angle de frottement interne initial.

c - Lieu d'écoulement effectif - Angle de frottement interne effectif.

A la suite de la phase initiale vient la phase d'écoulement établi pendant laquelle la masse volumique vrac du matériau ne varie pratiquement pas. L'échantillon cisailé avec un effort normal $N = N_c$ correspond à cette situation. Le point correspondant (σ_e, τ_e) (fig 1.5) sur le plan de MOHR se situe à l'extrémité du lieu d'écoulement et s'appelle "point d'écoulement établi ou stationnaire". Le lieu d'écoulement effectif est matérialisé par la droite passant par l'origine et enveloppe du plus grand cercle de MOHR. Ce dernier est tangent au lieu d'écoulement au point d'écoulement stationnaire. Le lieu d'écoulement effectif forme avec l'axe des σ l'angle de frottement interne effectif φ_e qui caractérise le frottement mobilisé dans le matériau pendant le régime établi.

d - Plus grande contrainte principale σ_1

σ_1 s'obtient par le plus grand cercle de Mohr

e - Stabilité σ_c du matériau

Le cercle de Mohr passant par l'origine et tangent au lieu d'écoulement initial donne la contrainte σ_c (Fig. 1.5) qui, par conséquent, agit sur un plan principal tel qu'une surface libre (car $\sigma_2 = 0$) : surface d'une voûte ou d'une cheminée stable selon le cas concerné par les mesures. σ_c correspond à la résistance à la compression de cette surface libre c'est à dire la limite de stabilité de l'obstacle (voûte ou cheminée stable) sous la contrainte principale σ_1 .

f - Lieux d'écoulement pour matériau à écoulement libre et pour matériau cohésif.

Les matériaux à écoulement libre, tels que les graviers et les sables secs, ne gagnent pratiquement pas de résistance pendant le stockage. Leurs lieux d'écoulement initiaux ne dépendent pratiquement pas de la contrainte de consolidation et par conséquent se confondent avec des lieux d'écoulement effectifs : $\varphi_i = \varphi_e = \varphi$ (φ est l'angle de frottement interne).

En revanche le comportement des matériaux cohésifs dépend de leurs états de consolidation. Pour différents degrés de consolidation N_{ci} correspondant à différentes masses volumiques ρ_i , un même matériau peut avoir une famille de lieux d'écoulement initiaux (Fig. 1.6) c'est-à-dire plusieurs degrés de cohésion. Mais l'expérience montre que la courbe enveloppe des plus grands cercles de Mohr est une droite qui passe par l'origine [38] : c'est le lieu d'écoulement effectif qui fait avec l'axe des σ_1 l'angle de frottement interne effectif φ_e . Ce dernier peut être différent de l'angle de frottement interne φ donné par les essais classiques de mécanique des sols. Sa valeur varie généralement entre 30° et 70° [38] suivant la nature du matériau et augmente avec la teneur en eau.

g - Lieux d'écoulement à la paroi - Angle de frottement à la paroi.

On détermine l'angle de frottement à la paroi φ_p en remplaçant la moitié inférieure de la cellule de cisaillement par un échantillon du matériau constituant la paroi (fig 1.7). Le lieu d'écoulement à la paroi est généralement linéaire pour les parois métalliques et non linéaire pour les parois en matières plastiques ; de plus il peut varier suivant la nature du matériau et l'état de contrainte sur les parois.

Dans ces conditions il convient de prendre la plus grande valeur de φ_p pour le dimensionnement des silos et trémies.

h - Fonction d'écoulement

La plus grande contrainte principale σ_1 informe sur l'état de consolidation du matériau dont dépendent ses propriétés d'écoulement, tandis que la stabilité σ_c renseigne, sur son aptitude à former un obstacle à l'écoulement. Ainsi la courbe $\sigma_c = f(\sigma_1)$, nommée fonction d'écoulement et notée FF, caractérise la qualité de l'écoulement du produit (fig 1.8). Parfois on définit aussi FF par le rapport σ_1/σ_c et JENIKE [38] a proposé la classification suivante :

1.2.2.3 - FACTEURS INFLUANTS SUR LES PROPRIETES D'ECOULEMENT DES MATERIAUX

Les propriétés d'écoulement dépendent non seulement du degré de consolidation (si le matériau peut développer une cohésion) mais aussi des conditions de frottement dans le matériau. Ces deux facteurs peuvent être influencés par certaines caractéristiques physico-géométriques des grains et par les conditions d'exploitation et l'environnement.

Dans le cadre du dosage des matériaux granulaires en centrale de fabrication les trois paramètres : teneur en eau, distribution granulométrique (granularité, teneur en fines), densité apparente jouent des rôles prépondérants sur l'aptitude du matériau à se compacter donc à accroître la cohésion. Il faut ajouter à ceux-là la vibration [5, 38], la hauteur de chute au remplissage et à la limite la température pour le cas des enrobés recyclés. Par ailleurs les paramètres tels que granularité, état de surface, angularité et teneur en eau conditionnent le frottement dans le matériau.

1.3 - ANALYSE DES CONTRAINTES DANS UNE TREMIE

La conception des matériels de stockage et de dosage dépend de la connaissance des contraintes qui s'y exercent. En effet un bon matériel doit avoir :

- une bonne résistance vis à vis des pressions statiques et dynamiques ainsi qu'aux chocs d'impact et aux dépressions causés par les ruptures des voûtes et des cheminées. A ce sujet, plusieurs méthodes de détermination des contraintes existent mais aucune d'elles ne fait l'unanimité jusqu'à présent. Dans la quasi-totalité des cas ce sont des approches théoriques issues de la mécanique des sols. Il s'agit donc de calculs quasi-statiques et le comportement du matériau a déjà été décrit au 1.2.1.1.3 . On se contentera de donner une classification des différentes méthodes car ce travail s'intéresse plus à la seconde condition qui suit.

- une forme géométrique optimale pour l'écoulement gravitaire et qui assure un débit régulier. Cette configuration doit alors causer systématiquement la rupture des voûtes et des cheminées lorsqu'elles se forment en entretenant des contraintes supérieures à leurs limites de stabilité.

1.3.1 - DETERMINATION DES CONTRAINTES EN STATIQUE ET PENDANT L'ECOULEMENT EN MASSE

1.3.1.1 - METHODE DE L'EQUILIBRE D'UNE TRANCHE INFINITESIMALE

Cette méthode consiste à étudier l'équilibre d'une tranche (horizontale ou circulaire [27]) et infinitésimale de matériau. La première formulation date de JANSSEN [36] qui étudiait les contraintes dans un silo cylindrique. Celle-ci reste d'ailleurs à la base des règles de dimensionnement des silos [1, 3] à cause de sa simplicité. Par suite de nombreux auteurs, [51, 57, 63, 77] pour ne citer que ceux-là, dérivèrent des formules corollaires en modifiant les hypothèses sur la répartition des contraintes et notamment sur le rapport entre la contrainte verticale σ_V et la contrainte horizontale σ_H ainsi que sur les conditions à la paroi. La méthode conduit généralement à intégrer une équation différentielle de type :

$$\frac{d\sigma_v}{dz} + f(\varphi, \theta_p, S(z)) \sigma_v = \pm \rho g \quad (1.2)$$

dans laquelle φ désigne l'angle de frottement interne du matériau, θ_p l'angle de frottement à la paroi et $S(z)$ la section à la hauteur z (du silo ou de la trémie). Le signe $\pm$ dépend de l'orientation de l'axe (Oz).

Dans le cas des silos à parois verticales la méthode de JANSSEN conduit à :

$$f(\varphi, \theta_p, S(z)) = \frac{k_a \tan \theta_p}{r_h} \quad (1.3)$$

k_a étant le coefficient de poussée pour le cas du remplissage et r_h le rayon hydraulique.

En ce qui concerne les trémies $S(z)$ dépend de la hauteur z et de l'angle d'inclinaison de la paroi θ_p . Les théories approximatives de WALKER [91] et WALTERS [92] figurent parmi les plus connues.

1.3.1.2 - METHODE DE L'EQUILIBRE D'UN ELEMENT INFINITESIMAL

Comme il s'agit de la méthode adoptée dans notre propre travail des renvois au chapitre 2 seront faits pour obtenir plus de détails. Cette méthode consiste à isoler un élément infinitésimal de matériau puis à étudier son équilibre (Cf. fig. 2.1). Elle conduit aux équations connues de l'équilibre des milieux continus. A celles-ci on substitue les équations de MOHR-COULOMB (Cf. formule (2.5)) traduisant l'état d'équilibre limite plastique. Il en résulte un système d'équations différentielles qui ne peut s'intégrer analytiquement. La résolution de ce système nécessite l'introduction d'équations ou d'hypothèses complémentaires même pour les méthodes numériques telles que celles illustrées ci-après.

1.3.1.2.1 - CHAMP DE CONTRAINTE RADIALE

Afin de résoudre le problème présenté ci-dessus JENIKE a proposé que les contraintes se répartissent radialement dans une trémie. Ainsi la contrainte moyenne s'écrit $\sigma = \rho g r f(\theta)$ dans un système de coordonnées polaires (r, θ) pour un écoulement plan ou sphériques (r, θ, φ) , pour un écoulement axisymétrique. L'écoulement étant convergent, JENIKE a admis l'hypothèse de HAAR et VON KARMAN [32] pour une symétrie axiale : la contrainte circonférentielle σ_φ vaut la contrainte principale majeure dans le plan (r, θ) . De plus il supposait que l'angle ϕ entre la direction radiale et la direction de la contrainte principale majeure (Cf. Fig. 2.1) ne dépend que de θ . Ainsi il a pu intégrer numériquement le système d'équations différentielles en négligeant les termes qui expriment les inerties des grains car il s'agit d'un écoulement lent. Mais la solution trouvée, le champ de contrainte radiale, ne vérifie pas toutes les conditions aux limites en particulier à la surface libre du matériau où elle prévoit des contraintes a priori non nulles. JENIKE n'a donc trouvé qu'une solution particulière mais il a montré [37] que la solution complète tend vers celle-ci quand r tend vers zéro. Autrement dit l'hypothèse de champ de contrainte radiale n'est valable qu'en base de trémie.

1.3.1.2.2 - CARACTERISTIQUES DES CONTRAINTES

La méthode des caractéristiques constitue un autre moyen de résoudre le système d'équations différentielles signalé plus haut en ajoutant deux relations purement mathématiques qui expriment les dérivées totales $d\sigma$ et $d\phi$ (σ étant la contrainte moyenne et ϕ l'angle que fait la facette considérée sur l'élément du matériau avec la direction de la contrainte principale majeure). Il en résulte un système d'équation aux dérivées partielles

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x}, \frac{\partial \sigma}{\partial y}, \frac{\partial \phi}{\partial x} \text{ et } \frac{\partial \phi}{\partial y}$$

(pour le cas d'un plan (o, x, y)).

Ce système parabolique admet une double famille de courbes, appelées caractéristiques, le long desquelles existent des solutions. On montre que ce réseau de caractéristiques coïncide avec les lignes de glissement et a pour équation :

$$\frac{dy}{dx} = \tan(\phi \pm \mu) \quad (1.4)$$

dans laquelle

$$\mu = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$$

Les conditions de glissement le long de ces lignes s'écrivent :

$$d\sigma \pm 2\sigma \tan\phi d\phi = \rho g(dy \pm \tan\phi dx) \quad (1.5)$$

Le signe + correspond à un réseau noté m^+

Le signe - correspond à un réseau noté m^-

Les deux réseaux (m^+ et m^-) sont orthogonaux

Une résolution par différences finies des relations (1.4) et (1.5) permet de déterminer les contraintes aux intersections des lignes caractéristiques et de représenter graphiquement celles-ci. La méthode a été principalement appliquée aux silos et trémies bidimensionnels [34, 35] et constitue une sérieuse alternative des différentes approches analytiques. R.M HORNES [34] tentait de l'appliquer au cas d'une symétrie de révolution en utilisant l'hypothèse de HAAR et VON KARMAN mais il se heurtait à des calculs laborieux et obtenait des résultats physiquement non interprétables.

1.3.1.3 - CONTRAINTES PENDANT LA PHASE INITIALE DE L'ÉCOULEMENT

Les expériences montrent qu'il existe au début d'une vidange [53] une phase transitoire généralement brève au cours de laquelle le matériau se dilate pour acquérir une masse volumique optimale à l'écoulement. Au cours de cette dilatation une forte poussée, nettement supérieure aux contraintes développées en statique et en phase d'écoulement établi, s'exerce sur les parois et peut endommager le matériel. Des chercheurs (JENIKE et JOHANSON [39, 40], WALTERS [92], BRANSBY et BLAIR-FISH [12], ENSTAD [27]) attribuent ce phénomène au passage du matériau de l'état actif (remplissage) à l'état passif (vidange). La zone de concentration de contrainte se situe à la surface de séparation entre le matériau en mouvement et le matériau en statique. Cette zone de commutation se propage donc du bas vers le haut dès le démarrage de l'écoulement. Elle s'arrête et se maintient au niveau de la jonction trémie-superstructure pour les silos à trémie. En effet un écoulement rigide règne généralement dans la superstructure donc le matériau ne se déforme pas. La contrainte de commutation est déterminée en calculant les contraintes dans la zone passive et en prenant comme surcharge le matériau dans la zone active. Ce calcul conduit généralement à une surestimation par rapport aux valeurs obtenues expérimentalement. Ainsi la phase initiale de l'écoulement reste encore mal connue.

1.3.2 - ETUDE DE L'ÉCOULEMENT EN CHEMINÉE

Dans la pratique on rencontre fréquemment l'écoulement en cheminée. En effet, l'utilisation des trémies à grande capacité de stockage va au détriment du mode d'écoulement en masse qui exige généralement des trémies à parois suffisamment escarpées (donc de faible volume). Ainsi l'écoulement en cheminée semble inévitable. L'essentiel c'est de pouvoir dimensionner la trémie de sorte que la cheminée ne se stabilise pas et que l'écoulement se déroule régulièrement à travers celle-ci.

1.3.2.1 - CONTRAINTES DÉVELOPPÉES PENDANT L'ÉCOULEMENT EN CHEMINÉE ET DIMENSIONNEMENT.

Il existe peu de méthodes pour la détermination des contraintes développées lors de l'écoulement en cheminée. Parmi ceux qui se penchaient à ce problème figurent JENIKE et ses collaborateurs. Leurs études couvrent les deux aspects du problème de dimensionnement :

- JENIKE, JOHANSON et CARSON [41, 42, 43] établissaient une théorie pour évaluer les efforts qui s'exercent sur les parois des silos à trémie durant l'écoulement en entonnoir. Ils proposaient à l'occasion des critères de dimensionnement vis-à-vis de ces efforts.

- JENIKE [38] proposait également un critère de dimensionnement géométrique. Il s'agit de donner à l'orifice de vidange une dimension adéquate pour que le phénomène de stabilisation de la cheminée ne se produise pas. Pour satisfaire cette condition il faut qu'à tout moment de la vidange le matériel entretienne des pressions supérieures à la stabilité σ_{ct} que le matériau gagnait pendant le stockage. L'écriture de l'égalité donne la dimension critique de l'orifice de sortie :

$$D = \frac{\sigma_{ct} G(\varphi_t)}{\rho g} \quad (1.6)$$

$G(\varphi_t)$ est une fonction de l'angle de frottement interne statique φ_t déterminée par JENIKE [] et donnée sous forme d'abaque [38]. φ_t s'obtient par la tangente au cercle de MOHR qui passe par l'origine (Cf 1.2.2.1.).

Généralement les critères de JENIKE sont assez sévères donc conduisent à un surdimensionnement.

1.3.2.2 - LIMITE ENTRE ECOULEMENT EN MASSE ET FORMATION DE CHEMINEE OU DE VOÛTE.

Pour un matériau et une trémie donnés il existe une valeur maximale θ_m de l'inclinaison des parois au delà de laquelle l'écoulement de masse ne peut avoir lieu et cède la place à un écoulement en cheminée voire à une formation de voûte.

D'abord, pour qu'il y ait glissement du matériau sur les parois θ_m doit vérifier la relation :

$$\theta_m \leq \frac{\pi}{2} - \varphi_p \quad (1.7)$$

dans laquelle φ_p désigne l'angle de frottement à la paroi. Dans la pratique cette condition ne suffit pas pour obtenir un écoulement en masse. Ainsi JENIKE proposait en 1961 [] une relation empirique :

$$\theta_m \leq 55^\circ - \frac{\varphi_e}{2} \quad (1.8)$$

Ensuite dans une publication ultérieure il proposait une autre condition empirique dans laquelle θ_m dépend de φ_p et de φ_e (angle de frottement interne effectif). Cette condition semble assez sévère.

Plus tard STAINFORTH et ASHLEY (1973) [86] reprenaient les études de JENIKE avec des poudres cohésives dont les lieux d'écoulement vérifient l'équation de WARREN SPRING (Cf Fig 1.10).

$$\left(\frac{\tau}{c}\right)^n = \frac{\sigma + T}{T} \quad (1.9)$$

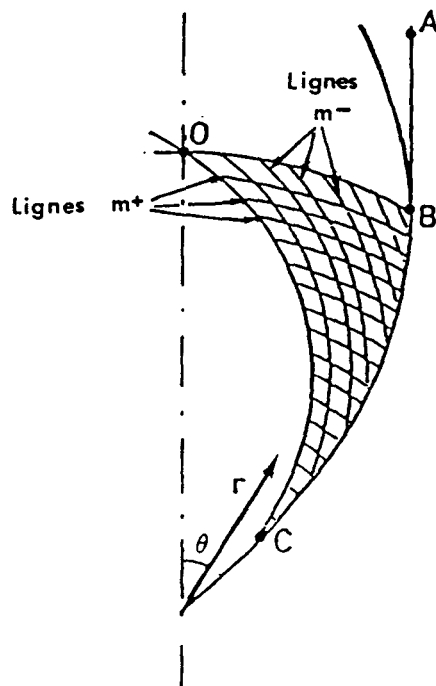
dans laquelle n désigne une constante dépendant du matériau, c sa cohésion et T sa résistance à la traction. La figure 1.10 illustre les explications qu'ils donnaient à la limite entre l'écoulement en masse et la formation de cheminée. Lorsque l'écoulement se produit l'élément de matériau subit une contrainte verticale σ_v , une contrainte horizontale σ_H et un cisaillement τ_{vH} et se déforme suivant le plan principal de cisaillement τ_{max} . Ce dernier fait angle θ_1 avec la verticale CV. Le lieu d'écoulement à la paroi rencontre le cercle de MOHR au point P. La direction CP qui fait

1.3.2.3 - FRONTIERE ENTRE CHEMINEE ET ZONE STAGNANTE

Lorsqu'il se produit un écoulement en cheminée, il arrive que tout le matériau ne passe pas à travers celle-ci. Une zone morte se forme à son pourtour. Ce problème typique des silos à fond plat peut arriver aux trémies lorsque leurs parois présentent des pentes trop faibles. La connaissance de la frontière de la zone stagnante permet de dimensionner le matériel en conséquence mais il existe très peu d'études orientées dans ce sens.

En 1966 GARDNER [29] élaborait une théorie qui prévoit la limite de la zone morte dans un silo à trémie de parois rugueuses (Fig. 1.11). En admettant avec JANSSEN (1895) qu'à une grande profondeur la contrainte ne varie plus avec la hauteur il a pu déterminer la contrainte sur la transition OB entre la superstructure et la trémie. A la base de la trémie il adoptait le champ de contrainte radiale de JENIKE et en déduisait la contrainte sur la ligne OC. Il appliquait ensuite la méthode des caractéristiques dans la zone intermédiaire OBC et proposait de prendre comme frontière de la zone stagnante la courbe enveloppe BC des caractéristiques m^- . GARDNER trouvait une bonne concordance entre sa théorie et les expérimentations qu'il avait réalisées mais la façon dont il définissait la répartition des contraintes dans le silo suscite des discussions.

Figure 1.11 - Frontière de la zone stagnante dans un silo à trémie (GARDNER)



Quelques années plus tard (1974) YANAHI et TAKAHASHI [37] proposaient une méthode analytique pour déterminer la limite de la zone stagnante en partant d'un silo à fond plat de parois lisses et rugueuses. Ils se servaient aussi de la méthode des caractéristiques en supposant que :

- la limite de la zone morte correspond à une caractéristique m^- .
- la contrainte moyenne σ reste constante le long de cette frontière.

Ces deux importantes hypothèses leur permettaient d'intégrer les équations des caractéristiques (Cf. formules (1.4) et (1.5)). Ils en déduisaient l'équation analytique de la ligne frontière. Ils réalisaient ensuite des expérimentations avec un matériel similaire à celui de GARDNER. Après confrontation ils concluaient que la théorie s'accordait avec les résultats expérimentaux et les travaux de GARDNER. La méthode de TAKAHASHI et YANAHI reste tout de même discutable à cause de la seconde hypothèse. En effet il n'y a aucune raison pour que la contrainte moyenne demeure constante le long de la ligne frontière.

1.3.3 - THEORIES APPROXIMATIVES SUR LA FORMATION DE VOUTE

A notre connaissance il n'existe pas de théorie élaborée pour l'étude des voûtes de type "géométrique" qui résultent de l'enchevêtrement des grains. Dans la pratique on se contente de fixer (empiriquement) une dimension minimale D_g de l'orifice de sortie en fonction de la taille maximale d_{max} des grains.
Pour certains cas :

$$D_g \geq 5 d_{max} \quad (1.11)$$

Les études présentées ci-dessous concernent les voûtes de type "cohésif" dues au colmatage par l'effet des forces de cohésion qui se développent dans les grains.

JENIKE [37] proposait la méthode la plus simple. Il étudiait l'équilibre d'une voûte d'envergure D_m et prenait comme hypothèses :

- l'effort de frottement à la paroi et la résistance σ_c de la voûte tendent à maintenir celle-ci stable.
- le matériau contenu dans la voûte tend à la déstabiliser tandis que le matériau situé au dessus ne pèse pas sur celle-ci.

JENIKE obtenait alors une expression de la dimension critique D_m de l'orifice de vidange pour avoir l'écoulement :

$$D_m = (1+m) \frac{\sigma_c}{\rho g} \quad (1.12)$$

$m = 0$ pour un écoulement plan et
 $m = 1$ pour un écoulement à symétrie axiale.

Plus tard WALKER [91] reprenait les mêmes hypothèses que JENIKE mais il introduisait la nature des trémies (profonde ou non) et l'aspect des parois (lisses ou rugueuses) :

- Pour une trémie peu profonde ou une trémie à parois rugueuse

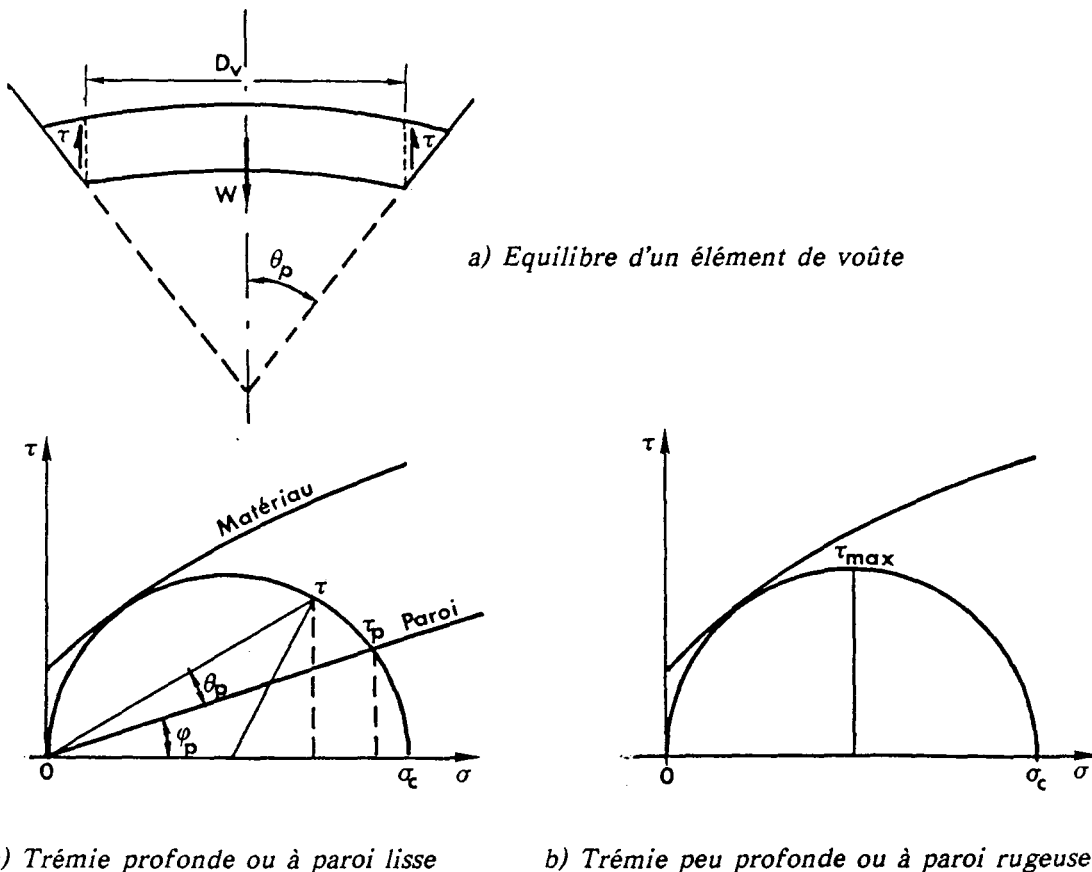
(fig. 1.12.a,b) le frottement se mobilise totalement sur la paroi et par conséquent le cisaillement vaut $\tau_{\max}$. Dans ce cas WALKER aboutit à la même formule (1.12) que JENIKE.

- Pour une trémie profonde ou une trémie à paroi lisse (fig. 1.12.a,c) le cisaillement à la paroi vaut τ_p . Cela permet de déterminer le cisaillement vertical τ connaissant l'angle de frottement à la paroi φ_p et l'inclinaison θ_p de cette dernière : L'écriture de l'équilibre de la voûte donne :

$$D_m = (1+m) \frac{\sigma_c}{\rho g} \sin 2(\theta_p + \varphi_p) \quad (1.13)$$

Le terme $\sin 2(\theta_p + \varphi_p)$ introduit les caractéristiques de la paroi. WALKER proposait de prendre ce terme égal à 1 si $(\theta_p + \varphi_p) \geq 45^\circ$ (paroi de pente faible)

Figure 1.12 - Approche de la formation de voûte par WALKER



Contrairement à JENIKE et WALKER, GARDNER et RICHMOND prenaient en compte l'influence du massif au dessus de la voûte. Ils considéraient le cas d'un massif de grande profondeur. Cela leur permettait de supposer que la contrainte dans une région juste au dessus de la voûte ne dépend pas de la hauteur :

- en 1962 GARDNER et RICHMOND [78] étudiaient le cas des parois verticales en essayant d'encadrer la dimension critique D_m par une limite inférieure et une limite supérieure. Après avoir réalisé des expérimentations ils concluaient que la borne supérieure donnait des résultats plus réalistes :

$$D_m = (1+m) \frac{c}{\rho g} \frac{\cos \varphi}{(1-\sin \varphi)} \quad (1.14)$$

En substituant la relation (1.18), qui lie la cohésion c et la stabilité σ_c de la voûte, à la formule (1.14) on obtient la formule (1.12) de JENIKE.

- En 1963 GARDNER [28] proposait une formule valable pour une paroi d'inclinaison quelconque et un écoulement plan :

$$D_m = \frac{2c}{\rho g} \left(\frac{\pi}{2} + \varphi \right) \frac{\cos \varphi}{1-\sin \varphi} \quad (1.15)$$

- en 1963 RICHMOND [79] établissait une méthode plus générale que celle de GARDNER :

$$D_m = 2(1+m) \frac{c}{\rho g} \frac{1+\sin \varphi}{1-\sin \varphi} \quad (1.16)$$

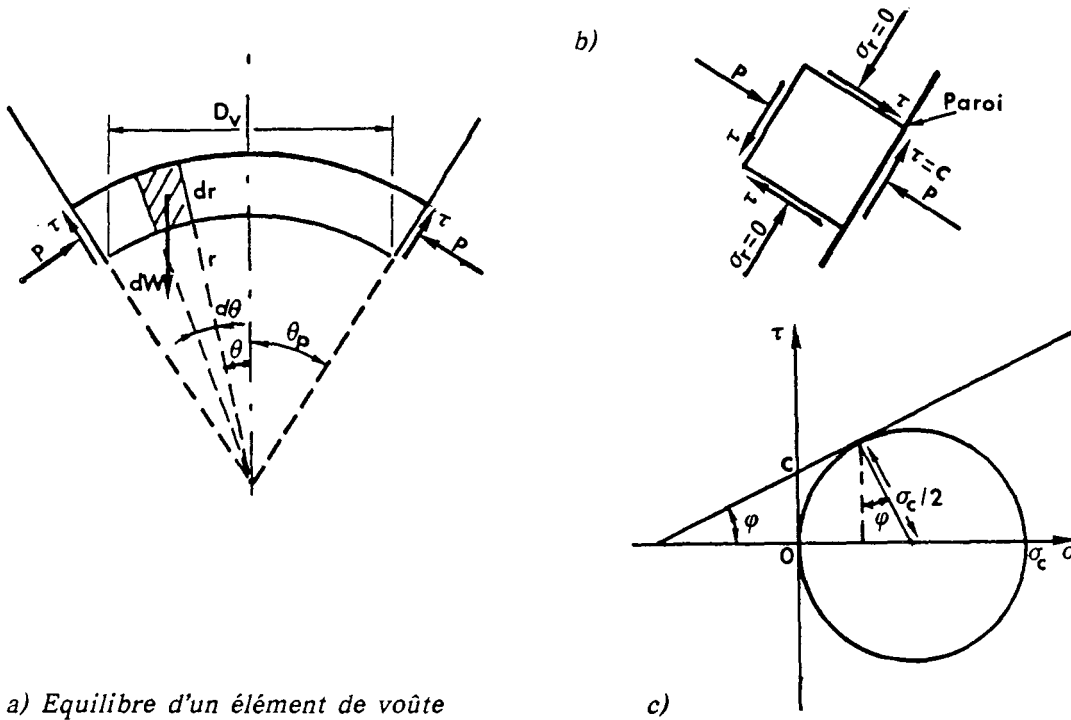
WALKER , RICHMOND et GARDNER montraient qu'ils étudiaient une voûte de forme parabolique. LENCZNER [52] considérait le cas d'une voûte circulaire qui ne supporte que son propre poids (hypothèse semblable à celle de JENIKE et WALKER) (fig. 1.13.a). Les figures 1.13.a et b illustrent les efforts qui s'appliquent sur la voûte. La condition d'équilibre de cette dernière donne :

$$D_m = \frac{\sigma_c}{\rho g} \left(\frac{\sin \theta_p}{\theta_p} \right)^{1-m} (1+\cos \theta_p)^m (2 \tan \varphi \sin \theta_p + \cos \theta_p) \quad (1.17)$$

La figure 1.12.c a permis à LENCZNER d'établir une relation entre la cohésion c d'un matériau de COULOMB ($\tau = c + \sigma \tan \varphi$) et sa stabilité σ_c

$$c = \frac{\sigma_c}{2} \frac{(1-\sin \varphi)}{\cos \varphi} \quad (1.18)$$

Figure 1.13 - Approche de la formation de voûte par LENCZNER



Les différentes formules présentées ci-dessus se composent de celle de JENIKE (la plus simple) et d'un facteur qui introduit :

- l'angle de frottement interne du matériau pour GARDNER et RICHMOND
- l'angle de frottement à la paroi φ_p et l'inclinaison θ_p de la paroi pour WALKER
- l'angle de frottement interne φ du matériau et l'inclinaison θ_p de la paroi pour LENCZNER.

Le tableau 1.1 résume les valeurs de la dimension critique D_m prédites par ces différents auteurs pour le même matériau et deux configurations de la trémie.

Comme la méthode JENIKE, la plus simple et la plus connue, a été constatée sévère dans la pratique il va de soi que LENCZNER, RICHMOND et GARDNER surdimensionnent D_m . La méthode de WALKER ne diffère de celle de JENIKE que pour les trémies peu profondes ou de parois rugueuses telles que $(\varphi_p + \theta_p) < 45^\circ$. Dans cette dernière condition WALKER prévoit des valeurs plus faibles de D_m .

Tableau 1.1. : Dimension critique de l'orifice de vidange
 Matériau : $\rho g = 9 \text{ kN/m}^3$; $\sigma_c = 5 \text{ kPa}$; $\varphi_p = 10^\circ$; $\varphi = 30^\circ$

AUTEUR	FORMULE	D_m (mètre)			
		Ecoulement plan		Symétrie axiale	
		$\theta_p = 0$	$\theta_p = 30^\circ$	$\theta_p = 0$	$\theta_p = 30^\circ$
JENIKE	(1. 12)	0. 56	0. 56	1. 12	1. 12
WALKER	(1. 13)	0. 19	0. 55	0.38	1. 10
GARDNER	(1. 15)	1. 16	1. 16	-	-
RICHMOND	(1. 16)	0. 96	0. 96	1. 92	1. 92
LENCZNER	(1. 17)	0. 56	0. 77	1. 12	1. 50

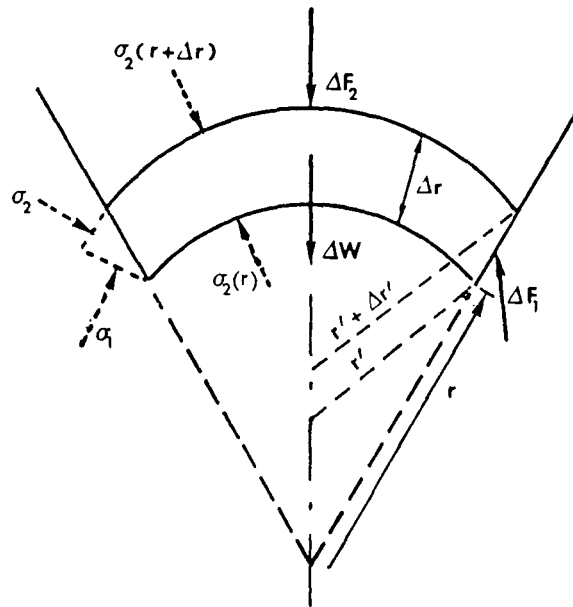
Le fait d'étudier l'équilibre d'une voûte qui ne supporte que son poids propre majore la valeur de D_m . En effet le matériau situé au dessus de la voûte pèse sur celle-ci et contribue à la détruire. Il faut donc en tenir compte. Après avoir fait ces remarques, ENSTAD (1975) [27] mettait au point une théorie sur les voûtes valable pour les trémies et les silos à trémies. Dans la superstructure du silo il considérait une répartition des contraintes selon JANSSEN. Dans la trémie il étudiait l'équilibre d'une tranche circulaire (Fig. 1.14). Ensuite il écrivait que la contrainte radiale σ_r s'annule à la surface de la voûte et supposait une fonction d'écoulement linéaire pour le matériau. Ainsi ENSTAD aboutissait à une expression analytique assez complexe de D_m pour obtenir des valeurs légèrement inférieures aux prédictions de JENIKE.

1.3.4 - MESURE DES CONTRAINTES

Pour la mesure des contraintes s'exerçant sur les parois les expérimentateurs utilisent généralement des capteurs à base de jauge d'extensométrie collés sur ces parois (Cf. [53, 54]). Les enregistrements, fournis par ces capteurs lors de l'écoulement, présentent cependant des fluctuations qui rendent parfois difficile leur utilisation pour tester des approches théoriques.

La détermination des contraintes au sein du matériau pose davantage des problèmes. Certains auteurs [88] utilisaient des lames d'acier munies de jauges de contrainte mais ce procédé perturbe énormément l'écoulement. D'autres se servaient de radio-pill [69]. Ces derniers émettent par variation d'inductance d'un circuit incorporé des signaux vers un capteur installé à l'extérieur des parois. Ces signaux donnent des indications sur les variations locales de vitesse et de contrainte pendant l'écoulement. Cependant il subsiste des doutes sur la position et l'orientation réelles du radio-pill et par conséquent sur la direction des contraintes à mesurer.

Figure 1.14 - Tranche infinitésimale d'ENSTAD pour déterminer les contraintes dans une trémie



1.4 - ANALYSE DU CHAMP DE VITESSE DANS UNE TREMIE

Parmi les différentes méthodes établies pour le calcul des vitesses dans une trémie il existe celles qui considèrent que le champ de vitesse dépend de l'état de contrainte et celles qui prétendent le contraire. Quoiqu'il en soit la connaissance de la distribution de vitesse permet d'évaluer la gamme de débit que peut fournir le matériel suivant la nature du matériau. D'ailleurs il existe dans la quasi-totalité des cas un point commun à ces différentes méthodes : l'utilisation de l'équation de continuité ou de conservation de masse du matériau.

1.4.1 - DETERMINATION DE LA VITESSE D'ECOULEMENT

1.4.1.1 - CARACTERISTIQUES DE VITESSE

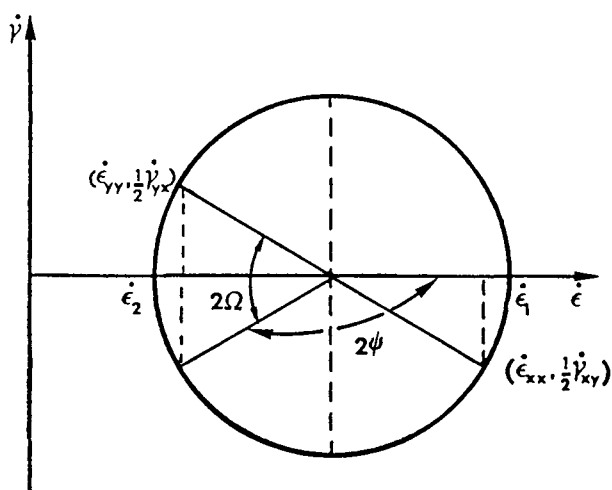
Pour établir les équations des caractéristiques de vitesse on considère la figure 1.15 qui représente sur le plan de MOHR la relation entre les vitesses de déformations ϵ et les taux de cisaillement γ . Désignons par ϕ l'angle entre la facette considérée sur l'élément et la direction de la contrainte principale majeure, Ω l'angle entre les directions principales des contraintes et les directions principales de déformation, u et v les déplacements suivant x et y , et ΔV la variation de volume. L'équation de continuité d'un matériau compressible en écoulement établi s'écrit :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \Delta V = 0 \quad (1.19)$$

tandis que le cercle de MOHR donne :

$$\frac{\dot{\gamma}_{xy}}{\dot{\epsilon}_{xx} - \dot{\epsilon}_{yy}} = \tan 2(\psi + \Omega) \quad (1.20)$$

Figure 1.15 - Cercle de MOHR des vitesses de déformation



Aux équations (1.19) et (1.20) on joint deux autres équations qui expriment les dérivées totales du et dv le long d'une ligne caractéristique (s = coordonnée curviligne). Il en résulte l'équation du mouvement le long des caractéristiques de vitesse :

$$du = dv \tan \left(\psi + \Omega \pm \frac{\pi}{4} \right) = - \frac{\cos \left(\theta + \Omega \pm \frac{\pi}{4} \right)}{\cos 2(\theta + \Omega)} \Delta V \cdot ds \quad (1.21)$$

Ces dernières ont pour équations :

$$\frac{dy}{dx} = \tan\left(\phi + \Omega \pm \frac{\pi}{4}\right) \quad (1.22)$$

Le choix de la valeur de Ω , l'inconnu du problème, a fait l'objet d'une discussion dans la partie 1.2.1.1.3.

1.4.1.2 - CHAMP DE VITESSE RADIALE

Dans un système de coordonnées polaires (r, θ) ou sphériques (r, θ, ϕ) la vitesse radiale V_r s'écrit :

$$V_r = \frac{f(\theta)}{r^{(1+m)}} \quad (1.23)$$

m vaut 0 pour un écoulement plan et 1 pour une symétrie de révolution.

L'expression (1.23) s'obtient en écrivant l'équation de continuité d'un matériau incompressible durant l'écoulement en masse établi. La fonction de distribution de vitesse $f(\theta)$ dépend de l'état de contrainte dans la trémie (Cf 2.1).

1.4.1.3 - CHAMP DE VITESSE ISSU D'UN MODELE CINEMATIQUE.

Les deux exemples de distribution de vitesse définie ci-dessus dépendent de l'état de contrainte dans la trémie. Il a été signalé à la partie 1.2.1.2.2 l'existence de modèles qui considèrent que le champ de vitesse résulte d'effets purement cinématiques. Parmi ceux-ci figurent le modèle stochastique de LITWINISZYN [56], repris et simplifié plus tard par MULLINS [66]. De ces deux modèles stochastiques découle une relation de type "équation de la diffusion" qui régit la distribution de vitesse. A partir des idées de LITWINISZYN, TÜZÜN [90], et, NEDDERMAN et TÜZÜN [67] proposaient un modèle cinématique non stochastique. Ce modèle était bâti à partir d'un système formé de trois particules A, B et C (fig. 1.16) : la particule A appartenant à une couche supérieure se déplace, sous l'effet de son poids propre, vers celle de plus grande vitesse parmi B et C. TÜZÜN et NEDDERMAN traduisent ce phénomène physique par l'équation :

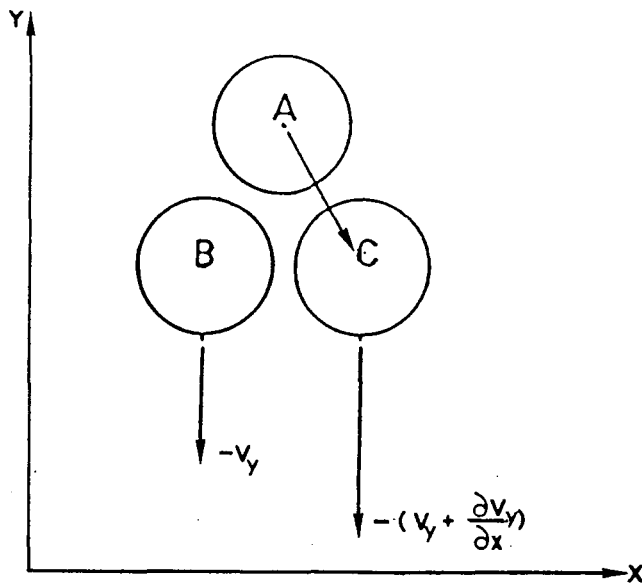
$$v_x = -b \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \quad (1.24)$$

dans laquelle v_x et v_y désignent les composantes suivant x et y de la vitesse et b une constante qui dépend de la taille moyenne des grains.

La relation (1.24) associée à l'équation de continuité donne :

$$\frac{\partial v_y}{\partial y} = b \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} \quad (1.25)$$

Figure 1.16 - Modèle cinématique d'écoulement proposé par TÜZÜN



Le champ de vitesse dans la trémie s'obtient à partir des relations (1.24) et (1.25) et des conditions aux limites.

Les modèles cinématiques qui viennent d'être signalés excluent l'existence de forces intergranulaires pouvant influencer l'écoulement. Ainsi ils ne donnent des résultats satisfaisants que pour les matériaux à écoulement libre et assez rapide. Leur particularité, intéressante, repose sur l'introduction d'un coefficient qui prend en compte la taille des grains. Une combinaison d'un modèle issu de la plasticité et d'un modèle cinématique permettrait de prendre en compte à la fois d'une part les effets de chargement et les effets cinématiques, et d'autre part les conditions à la surface libre et celles à l'orifice de sortie. Cette combinaison pourrait ainsi donner des bons résultats.

1.4.2 - DETERMINATION DU DEBIT MAXIMAL D'ECOULEMENT

1.4.2.1 - GENERALITE

Le débit maximal Q d'écoulement correspond à une sortie libre du matériau à l'orifice de vidange c'est-à-dire sans la présence d'un dispositif mécanique (d'extraction, d'évacuation, de dosage etc...) qui ralentit l'écoulement. Il s'agit donc du débit en vidange simple. Dans ce cas on suppose généralement que la contrainte s'annule à la sortie.

L'expression générale du débit massique Q s'écrit :

$$Q = \int_{\Sigma} \rho V dS \quad (1.26)$$

dans laquelle V représente la vitesse qui agit sur l'élément de surface dS appartenant à une section Σ de la trémie.

Pour le cas d'une distribution radiale V_r de la vitesse dans une trémie dont la paroi fait un angle θ_p avec la verticale et dont l'orifice de vidange se situe à une distance r_0 du sommet virtuel, le débit Q s'écrit :

$$Q = \int_0^{\theta_p} \rho V_r (2\pi r_0 \sin\theta)^m r_0 d\theta \quad (1.27)$$

$m = 0$ pour un écoulement symétrique plan

$m = 1$ pour un écoulement axisymétrique

Quelques modèles de débit maximal d'écoulement vont être présentés ci-après.

1.4.2.2 - MODELE DE SAVAGE - MODELE DE DAVIDSON ET NEDDERMAN

SAVAGE [80] adoptait un champ de vitesse radiale (C.f 1.4.1.2.). Afin de déterminer la fonction de distribution de vitesse $f(\theta)$ il écrivait les équations de la dynamique d'un élément de matériau et considérait :

- un matériau de COULOMB sans cohésion
- une trémie à parois de pente forte ($\cos \theta_p \approx 1$) et lisses ($\varphi_p = 0$)
- une contrainte nulle à la surface libre $r = r_1$ (sans surcharge) et à l'orifice de sortie $r = r_0$ (vidange simple).
- une symétrie radiale (donc implicitement l'hypothèse de HAAR et VON KARMAN).

DAVIDSON et NEDDERMAN [] étudiaient plus tard l'écoulement dans un sablier. Concernant le débit, ils avaient une autre manière de formuler les hypothèses précédentes mais ils obtenaient le même résultat que SAVAGE (pour le cas d'écoulement axisymétrique) :

$$Q = \frac{\pi}{4} \rho g^{\frac{1}{2}} D^{\frac{5}{2}} \left\{ \frac{1+k}{2(2k-3) \sin \theta_p} \left[\frac{1 - (r_1/r_0)^{3-2k}}{1 - (r_1/r_0)^{-2-2k}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1.28)$$

$$k = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}$$

D = dimension de l'orifice de vidange

Généralement dans la pratique $k \geq 3$ et le rapport r_1/r_0 est faible. Dans ce cas le terme entre crochets tend vers 1 et par conséquent le débit ne dépend pas de la hauteur de matériau.

1.4.2.3 - MODELE DE J.C. WILLIAMS

J.C. WILLIAMS [93] travaillait aussi avec un champ de vitesse radiale (Cf 1.4.4.1.2) mais à la différence avec SAVAGE, NEDDERMAN et DAVIDSON il considérait une trémie de parois lisses ou rugueuses et ayant une inclinaison θ_p quelconque. Pour établir l'expression de la vitesse il déterminait d'abord la valeur de la fonction $f(\theta)$ (formule (1.23)) sur l'axe central et sur la paroi moyennant une hypothèse sur la valeur à la paroi de

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \theta}$$

(φ étant l'angle que fait la direction radiale considérée avec la direction de la contrainte principale majeure). Pour les parois lisses il constatait que :

$$f(\theta_p) = f(0) \cos^{\frac{1}{2}} \theta_p$$

Il généralisait , par hypothèse, cette relation pour les parois lisses ($\varphi_p = 0$):

$$f(\theta) = f(0) \cos^{\frac{1}{2}} \theta \quad (1.29)$$

Connaissant $f(\theta_p)$ pour les parois rugueuses ($\varphi_p \neq 0$) il supposait que :

$$f(0) = f(\theta_p) \cos^{-\frac{1}{2}} \theta_p$$

- la relation (1.29) reste vraie pour $\varphi_p \neq 0$

Il obtenait alors une expression de $f(\theta)$ pour les parois rugueuses :

$$f(\theta) = f(\theta_p) \cos^{-\frac{1}{2}\theta_p} \cos^{\frac{1}{2}\theta} \quad (1.30)$$

La connaissance de $f(\theta)$ engendre celle de la vitesse radiale V_r et par conséquent celle du débit massique d'écoulement :

- pour les parois lisses ($\varphi_p = 0$):

$$Q = \frac{\pi}{3} \rho g^{\frac{1}{2}} D^{\frac{5}{2}} \left[\frac{1+k}{2(2k-3)} \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1 - \cos^{\frac{3}{2}\theta_p}}{\sin^{\frac{5}{2}\theta_p}} \right] \quad (1.31)$$

- Pour les parois rugueuses ($\varphi_p \neq 0$)

$$Q_{\min} = \frac{4}{3} \pi \rho f(\theta_p) \frac{1 - \cos^{\frac{3}{2}\theta_p}}{\cos^{\frac{1}{2}\theta_p}} \quad (1.32)$$

Les hypothèses prises par WILLIAMS pour les parois rugueuses entraînent une minoration du débit par rapport à sa valeur exacte mais inconnue d'où la notation $Q_{\min}$.

Dans ce cas il prend l'expression (1.31) comme majorant $Q_{\max}$.

1.4.2.4 - MODELE DE BROWN ET RICHARD (MINIMUM ENERGY THEOREM)

BROWN et RICHARD [13, 14] considéraient également un champ de vitesse radiale (Cf. 1.4.1.2.) et supposaient que l'énergie T développée dans le matériau pendant l'écoulement suit une loi de type BERNOULLI :

$$T = \frac{\sigma}{\rho} + V_r^2 + g r \cos \theta$$

Comme le frottement dans le matériau diminue vers la sortie, l'énergie T y devient minimum. Ainsi BROWN et RICHARD écrivaient $dT/dr = 0$ à la sortie en supposant de plus que la contrainte moyenne σ y est constante. Compte tenu de ces différentes hypothèses ils obtenaient sans difficulté l'expression de la vitesse d'écoulement ainsi que le débit massique :

$$Q = \frac{\pi \rho g^{\frac{1}{2}} D^{\frac{5}{2}}}{6} \frac{1 - \cos^{\frac{3}{2}} \theta_p}{\sin^{\frac{5}{2}} \theta_p} \quad (1.33)$$

1.4.2.5 - MODELE DE J.R JOHANSON

Le modèle de JOHANSON [45] prend en compte l'existence d'une cohésion dans certains matériaux contrairement aux précédents établis pour les matériaux à écoulement libre. Au départ JOHANSON étudiait l'équilibre d'une voûte dynamique située au voisinage de l'orifice de sortie, ayant une accélération verticale moyenne a_v , et soumise à son poids propre ainsi qu'à une pression P de la part des parois de la trémie. Ensuite il considérait le cas critique où la pression P égale la stabilité σ_c du matériau. De l'équation d'équilibre il déduisait l'expression de a_v dans laquelle il faisait apparaître la fonction d'écoulement FF du matériau et le facteur d'écoulement ff de la trémie (Cf. 1.2.2.1. h,i). Sachant que $a_v = VdV/dz$ (V est la vitesse verticale moyenne) en écoulement établi, JOHANSON déterminait V à l'orifice de sortie et par la suite le débit massique :

- Pour un écoulement plan :

$$Q = \rho g^{\frac{1}{2}} D^{\frac{3}{2}} l \left[\frac{1}{2 \tan \theta_p} \right]^{\frac{1}{2}} \left[1 - \frac{ff}{FF} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.34)$$

l = épaisseur de la trémie

- Pour un écoulement axisymétrique

$$Q = \frac{\pi}{4} \rho g^{\frac{1}{2}} D^{\frac{5}{2}} \left[\frac{1}{4 \tan \theta_p} \right]^{\frac{1}{2}} \left[1 - \frac{ff}{FF} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.35)$$

Lorsque le matériau ne possède pas de cohésion le terme ff/FF tend vers 0 donc le terme entre crochets tend vers 1. Pour les matériaux très cohésifs ff tend vers FF (en général $ff < FF$) et le terme entre crochets tend vers zéro de même que le débit d'écoulement.

1.4.2.6 - DISCUSSION SUR DIFFERENTS MODELES DE DEBIT

Les différents auteurs cités ci-dessus confrontaient leurs modèles théoriques de débit avec des résultats expérimentaux. Généralement leurs prédictions théoriques surestiment le débit. En particulier celles de NEDDERMAN et SAVAGE peuvent parfois conduire à un écart de 60 % (ou plus). Ce résultat peut être prévisible dans la mesure où leurs hypothèses impliquent avant tout des trémies à parois lisses ($\varphi_p = 0$) et escarpées ($\cos\theta_p \approx 1$). Les valeurs de $Q_{\max}$ et $Q_{\min}$ de J.C WILLIAMS encadrent bien les valeurs expérimentales pour les matériaux grossiers. En revanche pour les matériaux fins $Q_{\max}$ et $Q_{\min}$ se trouvent nettement au-dessus. L'auteur explique ce fait par l'effet de ralentissement causé par les fluides interstitiels mais qui n'a pas été pris en compte dans sa théorie. Sur ce propos MC LEAN [62] introduisait l'effet des gaz interstitiels dans sa théorie pour déterminer le débit d'écoulement. Néanmoins ses prédictions dépassent généralement (parfois largement) les valeurs expérimentales. Les comparaisons faites par J.R. JOHANSON montrent certaines bonnes concordances de sa théorie avec les données expérimentales aussi bien pour les matériaux grossiers que les matériaux fins et cohésifs. La figure 1.17 illustre les différentes approches théoriques qui viennent d'être discutées. Ces dernières ont été bâties en supposant un matériau continu. Or manifestement la taille des grains joue un rôle important dans le débit d'écoulement. Ce paramètre figure d'ailleurs dans plusieurs modèles empiriques de débit que nous n'avons pu présenter ici, notamment BEVERLOO [9] avec la formule suivante :

$$Q = C_B \rho g^{\frac{1}{2}} (D - k_B d)^{\frac{5}{2}} \quad (1.36)$$

dans laquelle C_B désigne un coefficient empirique, D le diamètre de l'orifice, d le diamètre moyen des grains et k_B un coefficient empirique introduisant la forme des grains.

La taille des grains est également prise en compte dans des modèles cinématiques (Cf [90]) qui eux non plus ne présentent pas un caractère complet car ils conviennent plutôt aux matériaux à écoulement libre et rapide.

1.4.3 - TECHNIQUE DE VISUALISATION ET DE MESURE DE LA VITESSE D'ECOULEMENT

L'étude du phénomène d'écoulement nécessite des travaux aussi bien sur le plan théorique que expérimental. Ainsi il existe une grande variété de techniques expérimentales pour visualiser le mode d'écoulement et déterminer le champ de vitesse. Nous allons en donner une liste succincte et non exhaustive.

1.4.3.1 - METHODE DES MARQUAGES

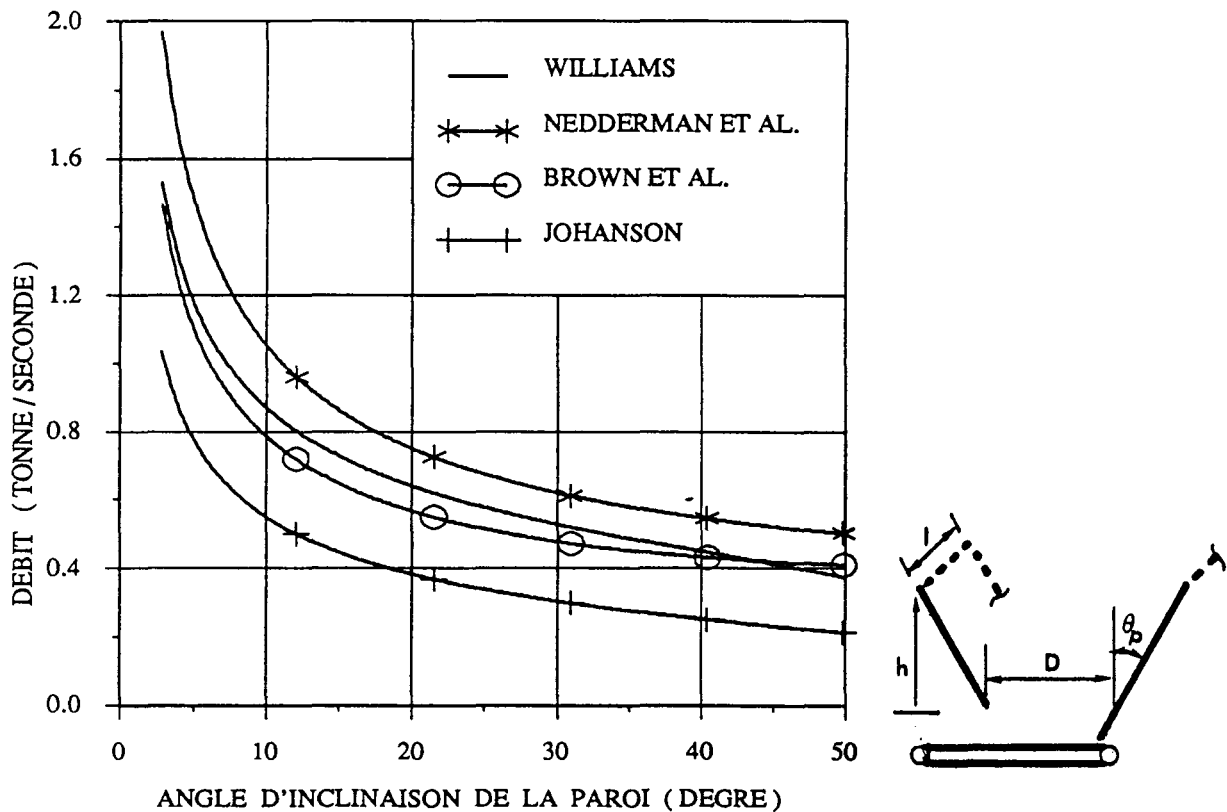
- Technique photographique : cette technique est généralement réalisée sur des modèles bidimensionnels de silo ou trémie dont les parois verticales transparentes permettent de photographier ou filmer l'écoulement. Les marqueurs colorés peuvent être disposés en bandes, quadrillage, rangées de points etc... (Cf [47, 55, 66])

- Techniques de mouillage et de congélation : ayant disposé le matériau en couches colorées, il s'agit d'arrêter l'écoulement à un instant donné et de mouiller ou de congeler [15] l'ensemble. Le

bloc obtenu peut être cassé en deux ou plusieurs parties sans s'effriter permettant ainsi de voir comment se déforme l'intérieur du modèle.

- Technique des boules marquées : on installe des boules numérotées dans le matériau au moment du remplissage. L'ordre d'apparition de celles-ci à la sortie pendant la vidange donne une information qualitative sur le mode d'écoulement (Cf [61]).

Figure 1.17 - Modèles de débit pour une vidange simple
Matériau : $\varphi_e = 40^\circ$, $\varphi_p = 25^\circ$, $D = 0.5 \text{ m}$, $\rho = 1.5 \text{ t/m}^3$



1.4.3.2 - TECHNIQUE STEREOPHOTOGRAMMETRIQUE

Un stéréocomparateur analyse "les faux reliefs" sur les images obtenues pendant l'écoulement. Le déplacement d'un point est proportionnel à sa profondeur fictive par rapport au plan frontal de l'image (Cf [10]).

1.4.3.3 - METHODE DE LA DETECTION

- détection des radio-pills (Cf. 1.3.4).
- détection des rayonnements γ : utilisation des traceurs radioactifs et mesure des densités locales (Cf [74, 75])
- radiographie X : pour observer les déplacements des marqueurs en plomb installés dans le matériau quand celui-ci s'écoule (Cf [12, 21]).

1.5 - BILAN

Les différentes études réalisées dans le cadre du stockage et de la vidange des matériaux granulaires dans les silos et trémies se présentent sous trois aspects fondamentaux :

- la définition du comportement du matériau ainsi que la détermination de ses propriétés d'écoulement,
- l'analyse des contraintes développées en statique, pendant l'écoulement et lors des formations de voûte et cheminée stables. Il en résulte des critères de dimensionnement du matériel du point de vue résistance vis à vis des efforts et du point de vue géométrique.
- l'analyse du champ de vitesse qui pour certains modèles dépend de l'état de contrainte. Dans ce dernier cas la connaissance de la distribution de vitesse permet d'évaluer le débit d'une vidange simple en supposant une contrainte nulle à la sortie.

L'étude entreprise dans la suite comporte les trois points évoqués mais cette fois il ne s'agit plus d'une vidange simple car il existe à la base de la trémie un dispositif de dosage.

Parmi les différentes approches possibles, celle qui découle de la mécanique des sols semble mieux s'adapter au problème. En effet, il s'agit d'étudier l'écoulement en trémie de dosage de matériaux qui peuvent former une cohésion à cause de la teneur en eau et de la teneur en fines et par conséquent colmater. De plus l'écoulement se produit généralement lentement pendant le dosage. On adopte la loi d'écoulement non associé sans toutefois recourir au principe de coaxialité (qui crée une controverse avec l'hypothèse d'incompressibilité) en attribuant une distribution de vitesse radiale ou champ de contrainte. Les définitions proposées par JENIKE conviennent donc concernant les angles de frottement interne initial φ_i et effectif φ_e ainsi que la stabilité (ou résistance) σ_c d'un obstacle (voûte et cheminée stables). σ_c introduit l'effet de la cohésion développée dans le matériau. L'analyse des contraintes s'oriente surtout sur l'étude des formations de voûte et cheminée en vue du dimensionnement géométrique d'un matériel de dosage des granulats.

En ce qui concerne les expérimentations la technique du marquage par traceur radioactif sera utilisée pour l'étude en modèles de trémie réelle et celle du marquage par points colorés pour l'étude en modèle réduit.

CHAPITRE 2

APPROCHE THEORIQUE DE L'ECOULEMENT EN VUE DU DOSAGE

2.1 - INTRODUCTION

L'approche théorique commence par l'étude de l'écoulement radial en masse afin de simplifier et mettre en équation les problèmes. La prise en compte de l'inertie suppose au départ un matériau à écoulement facile et introduit une dépendance entre champ de vitesse et état de contrainte. Il en résulte une expression générale de la fonction de distribution de vitesse qui dépend des caractéristiques du matériau et de la trémie ainsi que d'une surcharge éventuelle à la surface libre et de la contrainte agissant à la sortie. Cette contrainte est généralement supposée nulle pour le cas d'une vidange simple (sortie libre du matériau). Elle ne peut en revanche s'annuler pour le cas d'une trémie doseuse car la présence du dispositif de dosage à la base de celle-ci freine l'écoulement. La prise en compte de cette contrainte, déterminée en mettant à profit la connaissance du débit (fixé pendant la fabrication), introduit l'originalité de ce travail.

Ensuite l'étude se poursuit en considérant cette fois un matériau difficile, susceptible de former une voûte stable ou s'écouler en cheminée. L'écriture des conditions de blocage total ou partiel du matériau donne des fonctions qui décrivent les situations de voûte stable, de formation de cheminée ou d'écoulement en masse critique. Ainsi il devient possible de dimensionner géométriquement une trémie vis à vis de ces trois phénomènes en fonction des caractéristiques du matériau. On peut aussi faire une prévision sur l'aptitude d'une trémie à développer ou non un bon écoulement.

Le dispositif de dosage forme un tout avec la trémie et son contenu et doit être conçu en conséquence. L'approche de l'écoulement en masse permet de déterminer la charge qui s'exerce sur le tapis doseur en fonction des caractéristiques du matériau et de la trémie. L'écriture de l'équilibre du matériau isolé entre le tapis et la surface d'extraction permet d'introduire les caractéristiques du tapis et de l'ouverture d'évacuation. Il en résulte une méthode de dimensionnement du dispositif de dosage qui prend en compte les caractéristiques de la trémie et de son contenu.

2.2 - L'ÉCOULEMENT RADIAL EN MASSE

2.2.1 - ÉQUATIONS GÉNÉRALES DES CONTRAINTES ET DE LA FONCTION DE DISTRIBUTION DE VITESSE

2.2.1.1 - HYPOTHESES

Le matériau est homogène et se comporte comme un milieu continu. L'écoulement se produit en masse et pendant la phase établie la masse volumique vrac du matériau reste constante. Le matériau en écoulement se trouve à l'état plastique et obéit aux conditions de l'équilibre limite de MOHR-COULOMB. L'écoulement étant convergent, un état d'équilibre limite passif règne dans la trémie. Les grains s'écoulent librement, ne reçoivent pas de résistance vis-à-vis de l'air interstitiel et leurs inerties interviennent. L'étude s'intéresse à deux types d'écoulement : un écoulement plan symétrique et un écoulement axisymétrique (trémie tronconique ou pyramidale). Une symétrie radiale règne dans la trémie favorisant le développement d'un champ de vitesse radiale.

2.2.1.2 - FORMULATION DU PROBLEME

On travaille dans un système de coordonnées polaires (r, θ) ou sphériques (r, θ, φ) suivant le type d'écoulement à considérer. La valeur de $m = 0$ correspond au cas plan et celle de $m = 1$ correspond au cas axisymétrique. L'équilibre dynamique d'un élément infinitésimal $(\Delta r, r\Delta\theta, r\sin\theta\Delta\varphi)$ isolé dans la partie gauche de la trémie donne (fig.2.1) :

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{1}{r} [\sigma_r - \sigma_\theta + m(\sigma_\theta - \sigma_\varphi) + m\tau_{r\theta} \cot\theta] + \rho a_r = -\rho g \cos\theta \\ \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{r} [m(\sigma_\theta - \sigma_\varphi) \cot\theta + (2+m)\tau_{r\theta}] + \rho a_\theta = \rho g \sin\theta \end{cases} \quad (2.1)$$

avec a_r et a_θ les composantes de l'accélération suivant r et θ . La composante a_φ de celle-ci suivant φ et la contrainte tangentielle $\tau_{r\varphi}$ sont nulles à cause de la symétrie radiale. Comme il y a symétrie de révolution et déformation vers l'axe (écoulement convergent) on adopte l'hypothèse de HAAR et VON KARMAN :

$$\sigma_\varphi = \sigma_l \quad (2.2)$$

σ_φ désigne la contrainte circonférentielle et σ_l la contrainte principale majeure.

Le régime d'écoulement établi implique les différents paramètres entrant dans le phénomène ne dépendent pas du temps.

L'hypothèse de vitesse radiale fait que les composantes v_θ et v_φ de la vitesse suivant θ et φ s'annulent. Il en résulte que $a_\theta = 0$ et l'équation de continuité du matériau s'écrit :

$$\frac{1}{r^{1+m}} \frac{\partial}{\partial r} (v_r r^{1+m}) = 0 \quad (2.3)$$

La relation (2.3) donne :

$$\begin{cases} v_r = \frac{f(\theta)}{r^{1+m}} \\ a_r = v_r \frac{dv_r}{dr} = - (m+1) f^2(\theta) \frac{1}{r^{3+2m}} \end{cases} \quad (2.4)$$

Figure 2.1 - Equilibre d'un élément de matériau dans une trémie

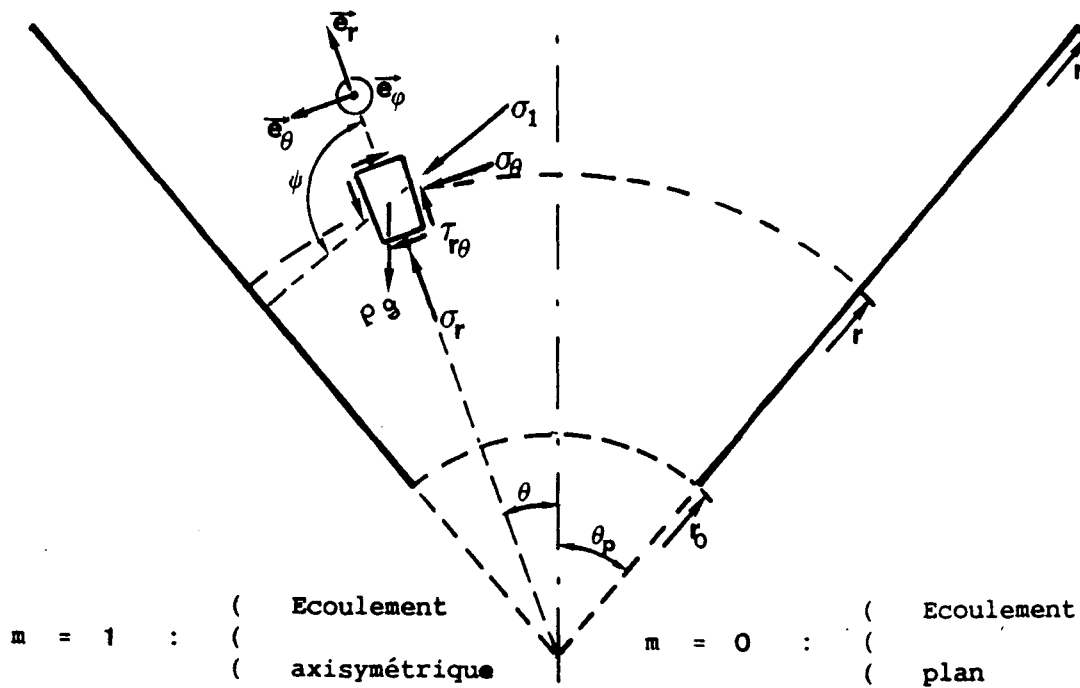
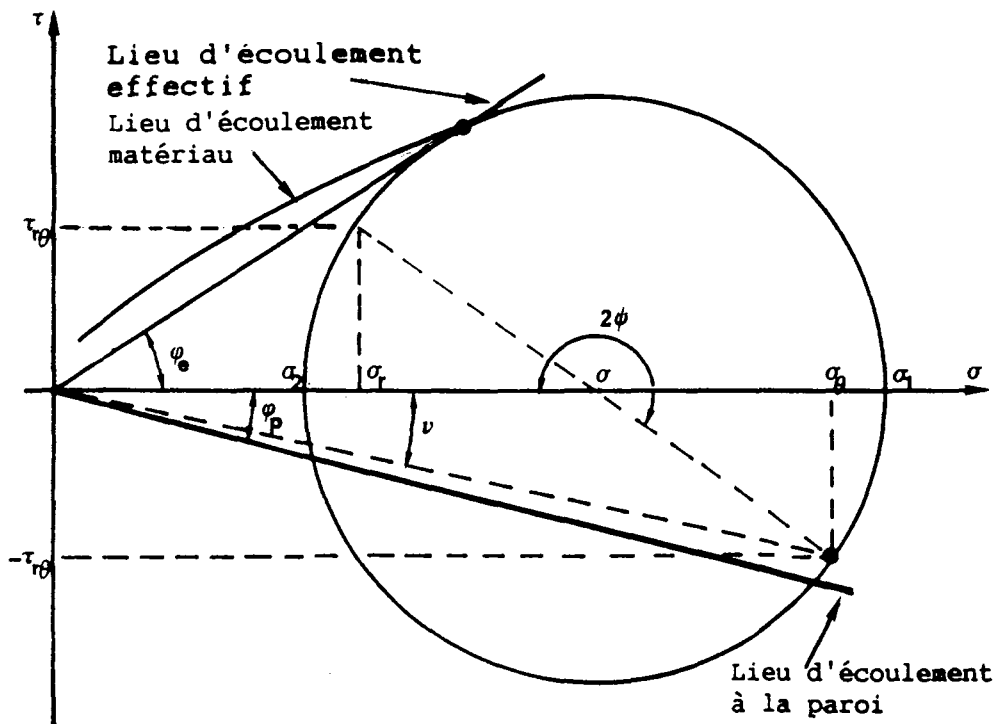


Figure 2.2 - Représentation d'une facette de l'élément isolé sur le cercle de Mohr



La fonction à déterminer $f(\theta)$ ne dépend que de θ et s'appelle fonction de distribution de vitesse.

Les conditions de MÔHR-COULOMB appliquées à l'élément isolé dans la figure 2.1 s'écrivent (fig. 2.2)

$$\begin{cases} \sigma_r = \sigma(1 + \sin\varphi_e \cos 2\psi) \\ \sigma_\theta = \sigma(1 - \sin\varphi_e \cos 2\psi) \\ \tau_{r\theta} = \sigma \sin\varphi_e \sin 2\psi \end{cases} \quad (2.5)$$

φ_e , σ et ψ désignent respectivement l'angle de frottement interne effectif, la contrainte moyenne et l'angle entre la direction radiale et la direction de la contrainte principale majeure.

$$\sigma = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \quad (2.6)$$

avec σ_2 la contrainte principale mineure

$$2\psi = \pi + \nu + \text{Arcsin} \left(\frac{\sin \nu}{\sin \varphi_e} \right) \quad (2.7)$$

avec ν l'obliquité de la contrainte.

A la paroi $\nu = \varphi_p$ = angle de frottement matériau-paroi.

On admet généralement (voir [23, 39, 93]) que la fonction ψ ne dépend que de θ afin de simplifier le problème :

$$\psi = \psi(\theta) \quad (2.8)$$

2.2.1.3 - EQUATIONS DU MOUVEMENT

En portant les équations (2.2) à (2.6) et (2.8) dans (2.1) on obtient :

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma}{\partial r} (1 + \sin\varphi_e \cos 2\psi) + \frac{\sigma}{r} [\sin\varphi_e \cos 2\psi (2 + m + \frac{2d\psi}{d\theta}) + m \sin\varphi_e \sin 2\psi \cot \theta - m \sin\varphi_e] \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma}{\partial \theta} \sin\varphi_e \sin 2\psi + \rho a_r = -\rho g \cos \theta \end{cases} \quad (2.9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \sigma}{\partial r} \sin \varphi_e \sin 2\psi + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma}{\partial \theta} (1 - \sin \varphi_e \cos 2\psi) + \frac{\sigma}{r} [\sin \varphi_e \sin 2\psi (2 \frac{d\psi}{d\theta} + 2 + m) \\ - m \sin \varphi_e (\cos 2\psi + 1) \cot \theta] = \rho g \sin \theta \end{array} \right. \quad (2.10)$$

La substitution de $\partial \sigma / \partial \theta$ dans (2.9) à partir de sa valeur obtenue avec (2.10) donne une équation différentielle de la forme :

$$\frac{\partial \sigma}{\partial r} + \frac{P}{r} \sigma = X + f^2(\theta) Y r^{-3-2m} \quad (2.11)$$

dans laquelle

$$\left\{ \begin{array}{l} P = \left\{ \frac{\sin \varphi_e \cos 2\psi - \sin^2 \varphi_e}{\cos^2 \varphi_e} (2 + m + 2 \frac{d\psi}{d\theta}) + \frac{m}{\cos^2 \theta} [\cot \theta \sin \varphi_e \sin 2\psi (1 - \sin \varphi_e \right. \\ \left. - \sin \varphi_e \cos 2\psi) - \sin \varphi_e + \sin^2 \varphi_e \cos 2\psi] \right\} \\ X = -\rho g \left[\frac{1 - \sin \varphi_e \cos 2\psi}{\cos^2 \varphi_e} \cos \theta + \frac{\sin \varphi_e \sin 2\psi}{\cos^2 \varphi_e} \right] \\ Y = \rho(m+1) \frac{1 - \sin \varphi_e \cos 2\psi}{\cos^2 \varphi_e} \end{array} \right. \quad (2.12)$$

$$f(\theta) = v_r / r^{m+1}$$

L'équation (2.11), à variables séparables r et θ s'intègre en r pour donner la solution générale :

$$\sigma r^P = \int (X r^P + Y r^{P-3-2m}) dr + C \quad (2.13)$$

Au cas où $P+1$ et $P-2-2m$ sont non nuls (2.13) devient :

$$\sigma r^P = \frac{X}{P+1} r^{P+1} + \frac{f^2(\theta) Y}{P-2-2m} r^{P-2-2m} + C \quad (2.14)$$

avec

C = constante

Si $\sigma = \sigma_s$ à la surface libre ($r = r_1$) et $\sigma = \sigma_0(\theta)$ à l'orifice de sortie ($r = r_0$), alors :

$$f^2(\theta) = \frac{P-2(m+1)}{[r_0^{P-2(m+1)} - r_1^{P-2(m+1)}]Y} \left[\sigma_0 r_0^P - \sigma_s r_1^P - \frac{X}{P+1} (r_0^{P+1} - r_1^{P+1}) \right] \quad (2.15)$$

$$\sigma = \frac{X}{P+1} r + \frac{f^2(\theta)Y}{P-2(m+1)} [r^{-2(m+1)} - r^{-P} r_0^{P-2(m+1)}] + r^{-P} \left[\sigma_0 r_0^P - \frac{X}{P+1} r_0^{P+1} \right] \quad (2.16)$$

En substituant $f(\theta)$ dans (2.16) par sa valeur dans (2.15) on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = \frac{X}{P+1} r + \frac{[r^{-2(m+1)} - r^{-P} r_0^{P-2(m+1)}]}{[r_0^{P-2(m+1)} - r_1^{P-2(m+1)}]} \left[\sigma_0 r_0^P - \sigma_s r_1^P - \frac{X}{P+1} (r_0^{P+1} - r_1^{P+1}) \right] \\ + r^{-P} \left(\sigma_0 r_0^P - \frac{X}{P+1} r_0^{P+1} \right) \end{array} \right. \quad (2.17)$$

si $\sigma_0(\theta)$, σ_s et $\phi(\theta)$ sont connues les contraintes dans la trémie ainsi que la distribution de vitesse seront complètement déterminées à partir de (2.15) et (2.17). Mais $\sigma_0(\theta)$ et notamment $\phi(\theta)$ ne peuvent être déterminées à partir des hypothèses et formulation établies ci-dessus. Les solutions exactes en σ et $f(\theta)$ demeurent donc inconnues. La suite consiste à trouver des solutions approximatives à partir de solutions particulières connues aux limites.

2.2.2 - CONDITIONS AUX LIMITES

On note par k le coefficient de butée

$$k = \frac{1 + \sin \phi_e}{1 - \sin \phi_e} \quad (2.18)$$

2.2.2.1 - CONDITIONS SUR L'AXE CENTRAL

Notations (sur l'axe) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_a = \sigma_o (0) \\ X_a = - \frac{k+1}{2} \\ Y_a = \frac{(1+k)(m+1)}{2} \\ P_a = (1-k)(m+1) \end{array} \right. \quad (2.19)$$

Sur l'axe central, le calcul donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi = \frac{\pi}{2} (\gamma = 0) \\ \left(\frac{d\phi}{d\theta} \right)_a = 0 \quad (\text{symétrie}) \\ X = \rho g X_a \\ Y = \rho Y_a \\ P = P_a \end{array} \right. \quad (2.20)$$

Pour le calcul de P il faut remarquer que

$$\lim_{\theta \rightarrow 0} \sin 2\phi \cot \theta = 0$$

2.2.2.2 - CONDITIONS A LA PAROI

Notations (à la paroi)

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_p = \sigma_o(\theta)_p \\ \phi_p = \phi \\ \theta_p = \theta \\ X_1 = - \frac{1 - \sin \phi_e \cos 2\phi_p}{\cos^2 \phi_e} \\ X_2 = - \frac{\sin \phi_e \sin 2\phi_p}{\cos^2 \phi_e} \\ Y_1 = \frac{1 - \sin \phi_e \cos 2\phi_p}{\cos^2 \phi_e} \\ P_1 = \frac{\sin \phi_e \cos 2\phi_p \sin^2 \phi_e}{\cos^2 \phi_e} [2 + m + 2 \left(\frac{d\phi}{d\theta} \right)_p] + \frac{m}{\cos^2 \phi_e} [- \sin \phi_e + \sin^2 \phi_e \cos^2 \phi_p] \\ P_2 = \frac{m}{\cos^2 \phi_e} [\sin \phi_e \sin 2\phi_p (1 - \sin \phi_e - \sin \phi_e \cos 2\phi_p)] \end{array} \right. \quad (2.21)$$

- Pour une paroi rugueuse le calcul donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} X = \rho g (X_1 \cos \theta_p + X_2 \sin \theta_p) \\ Y = \rho Y_1 \\ P = P_1 + P_2 \cot \theta_p \\ \phi_p = \frac{1}{2} \left[\pi + \varphi_p + \text{Arcsin} \left(\frac{\sin \varphi_p}{\sin \varphi_e} \right) \right] \end{array} \right. \quad (2.22)$$

$$\left(\frac{d\phi}{d\theta} \right)_p$$

n'est pas connue. Prenons par hypothèse la variation moyenne de ϕ entre l'axe et la paroi :

$$\left(\frac{d\phi}{d\theta} \right)_p = \frac{\phi_p - \frac{\pi}{2}}{\theta_p} \quad (2.23)$$

On signalera dans 2.3.4 l'avantage de multiplier cette valeur par un coefficient n pour ajuster certaines erreurs d'approximation :

$$\left(\frac{d\phi}{d\theta} \right) = n \frac{\phi_p - \frac{\pi}{2}}{\theta_p} \quad (2.24)$$

J.C. WILLIAMS [93] montrait que la valeur de n (≥ 1) influe peu sur la valeur du débit d'écoulement. Il prenait $n = 2$ et, dans ce cas, le terme qui introduit la hauteur de matériau dans la formule du débit tend généralement vers 1.

- Pour une paroi lisse ($\varphi_p = 0$) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_p = \frac{\pi}{2} \\ \left(\frac{d\phi}{d\theta} \right)_p = 0 \\ X = \rho g X_a \cos \theta_p \\ Y = \rho Y_a \\ P = P_a \end{array} \right. \quad (2.25)$$

2.2.3 - APPROCHE DE LA DISTRIBUTION DE VITESSE

L'expression (2.15) exprimant le carré de la fonction de distribution de vitesse peut s'écrire :

$$f^2(\theta) = \frac{P-2(m+1)}{Y} \left[\frac{\sigma_0 r_0^P - \sigma_s r_l^P}{r_0^{P-2(m+1)}} h_2(u) - \frac{X}{P+1} r_0^{2m+3} h_1(u) \right] \quad (2.26)$$

dans laquelle

$$u = \frac{r_0}{r_l}, \quad h_1(u) = \frac{1 - u^{-P-1}}{1 - u^{2(m+1)-P}}$$

$$h_2(u) = \frac{1}{1 - u^{2(m+1)-P}}$$

2.2.3.1 - CAS D'UNE VIDANGE SIMPLE

La vidange simple signifie qu'il n'existe pas de dispositif mécanique d'extraction ou de dosage. Le matériau s'écoule donc librement à la base de la trémie. Cette partie constitue un rappel des hypothèses de J.C. WILLIAMS [93] mentionnées au 1.4.2.3 et que nous allons étendre au cas du dosage. Un écoulement libre à l'orifice correspond à $\sigma_0 = 0$. Dans le cas où il n'y a pas de surcharge à la surface libre $\sigma_s = 0$ l'expression (2.26) devient :

$$f^2(0) = \frac{-P+2(m+1)}{Y} \frac{X}{P+1} r_0^{2m+3} h_1(u) \quad (2.27)$$

- Cas d'une paroi lisse ($\varphi = 0$)

$$\begin{cases} f^2(\theta) = \frac{2(m+1)-P_a}{Y} g \frac{X_a}{P_a+1} r_0^{2m+3} h_1(u) \\ f^2(\theta_p) = \frac{2(m+1)-P_a}{Y} g \frac{X_a \cos \theta_p}{P_a+1} r_0^{2m+3} h_1(u) \end{cases} \quad (2.28)$$

donc

$$f(\theta_p) = f(0) \cos^{\frac{1}{2}} \theta_p \quad (2.29)$$

J.C. WILLIAMS généralisait cette dernière expression valable à l'axe et à la paroi, dans toute la trémie :

$$f(\theta_p) = f(0) \cos^{\frac{1}{2}} \theta \quad (2.30)$$

Par conséquent la vitesse radiale s'écrit :

$$v_r = \frac{f(0) \cos^{\frac{1}{2}} \theta}{r^{1+m}}$$

- Cas d'une paroi rugueuse ($\varphi_p \neq 0$)

Il n'existe pas de relation explicite entre $f(0)$ et $f(\theta_p)$ donc J.C WILLIAMS suppose que les relations (2.29) et (2.30) restent valables. Il détermine $f(\theta_p)$ et prend :

$$f(0) = f(\theta_p) \cos^{-\frac{1}{2}} \theta_p \quad (2.31)$$

L'hypothèse entraîne une sous-estimation de la valeur de $f(0)$ mais introduit l'effet de l'angle de frottement à la paroi φ_p . La vitesse radiale dans la trémie s'écrit :

$$v_r = \frac{f(\theta_p) \cos^{-\frac{1}{2}} \theta_p}{r^{1+m}} \cos^{\frac{1}{2}} \theta$$

2.2.3.2 - CAS DU DOSAGE

Cette fois la présence du dispositif de dosage à la base de la trémie fait que la contrainte $\sigma_0(\theta)$ ne s'annule pas a priori. On considère toujours le cas où il n'y a pas de surcharge à la surface libre ($\sigma_s = 0$). La relation (2.26) s'écrit :

$$f^2(\theta) = \frac{P-2(m+1)}{Y} \left[\sigma_0 r_0^{2(m+1)} h_2(u) - \frac{X}{P+1} r_0^{2m+3} h_1(u) \right] \quad (2.32)$$

Afin d'obtenir une formule approximative de la distribution de vitesse et de l'état de contrainte dans la trémie pendant le dosage on fait l'hypothèse que les expressions (2.29) et (2.30) restent valables au cas $\sigma_0 \neq 0$. Dans cette condition :

- pour une paroi lisse :

$$v_r = \frac{f(0) \cos^{\frac{1}{2}} \theta}{r^{1+m}} \quad (2.33)$$

Puisque les valeurs de $f(\theta)$ au centre et à la paroi s'expriment par :

$$\begin{cases} f^2(0) = \frac{P_a - 2(m+1)}{\rho Y_a} \left[\sigma_a r_o^{2(m+1)} h_2(u) - \frac{g X_a}{P_a + 1} r_o^{2m+3} h_1(u) \right] \\ f^2(\theta_p) = \frac{P_a - 2(m+1)}{\rho Y_a} \left[\sigma_p r_o^{2(m+1)} h_2(u) - \frac{g X_a \cos \theta_p}{P_a + 1} r_o^{2m+3} h_1(u) \right] \end{cases} \quad (2.34)$$

l'hypothèse qui vient d'être faite entraîne :

$$\sigma_p = \sigma_a \cos \theta_p$$

et

$$\sigma_0(\theta) = \sigma_a \cos \theta \quad (2.35)$$

- pour une paroi rugueuse ($\varphi_p \neq 0$)

$$v_r = \frac{f(\theta_p) \cos^{-\frac{1}{2}} \theta_p}{r^{1+m}} \cos^{\frac{1}{2}} \theta \quad (2.36)$$

- Considérons aussi que (2.35) reste valable :

$$\sigma_0(\theta) = \sigma_a \cos \theta$$

La connaissance de la distribution de vitesse dans la trémie ne dépend plus maintenant que de σ_a . La partie 2.2.5 montre comment σ_a peut être déterminée connaissant le débit auquel le dosage s'effectue.

2.2.3.3 - CAS GENERAL

Les deux types de distribution de vitesse précédents peuvent être synthétisés dans une même formule :

$$\begin{cases} f^2(\theta) = \frac{P-2(m+1)}{Y} \left[\sigma_a r_o^{2m+2} h_2(u) - \frac{X}{(P+1)\cos\theta_p} r_o^{2m+3} h_1(u) \right] \cos\theta \\ v_r = \frac{f(\theta)}{r^{1+m}} = \frac{v_a \cos^{\frac{1}{2}} \theta}{r^{1+m}} \end{cases} \quad (2.37)$$

avec :

$$v_a = \left\{ \frac{P-2(m+1)}{Y} \left[\sigma_a r_o^{2m+2} h_2(u) - \frac{X}{(P+1)\cos\theta_p} r_o^{2m+3} h_1(u) \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

Dans l'expression de $f(\theta)$ il faut prendre pour X , Y et P leurs valeurs données par

- (2.25) lorsque $\varphi_p = 0$ (paroi lisse)

- (2.22) lorsque $\varphi_p \neq 0$

2.2.4 APPROCHE DU DEBIT D'ECOULEMENT

Connaissant la distribution de vitesse, le débit se calcule suivant la formule (1.27) établie au 1.4.2.1. Les résultats donnés ci-après en découlent.

2.2.4.1 - CAS D'UN ECOULEMENT NATUREL

Il s'agit d'une vidange simple. Soit Q le débit. Q correspond donc au débit maximal que la trémie peut fournir avec le même matériau. Les résultats obtenus sont évidemment ceux de WILLIAMS pour l'écoulement axisymétrique ($m=1$). Seulement les formules établies ci-dessous prennent aussi en compte l'écoulement plan ($m=0$).

En outre le terme $h_1(u)$ figure dans cette formule. Il introduit l'influence de la hauteur de matériau sur le débit. Généralement pour $u \leq 25$, $\varphi_e \geq 30^\circ$ et $\varphi_p \leq 25^\circ$, $h_1(u)$ tend vers 1 notamment dans le cas d'écoulement axisymétrique. Ainsi ce terme disparaît de l'expression du débit qui devient indépendant de la hauteur de matériau.

Si $\varphi_p = 0$

$$Q = 2 \left(\frac{2\pi}{3} \right)^m \rho l^{(1-m)} f(0) J^{(1-m)} \left(1 - \cos^{\frac{3}{2}} \theta_p \right)^m \quad (2.38)$$

Si $\varphi_p \neq 0$

$$Q = 2 \left(\frac{2\pi}{3} \right)^m \rho l^{(1-m)} f(\theta_p) J^{(1-m)} \left(1 - \cos^{\frac{3}{2}} \theta_p \right)^m \cos^{-\frac{1}{2}} \theta_p \quad (2.39)$$

Dans ces deux formules :

l = épaisseur de la trémie bidimensionnelle

$$J = \int_0^{\theta_p} \cos^{\frac{1}{2}} \theta \, d\theta \quad (2.40)$$

$f(0)$ et $f(\theta_p)$ se calculent à partir de (2.27).

2.2.4.2 - CAS D'ÉCOULEMENT FREINÉ

L'existence de cohésion dans le matériau, ou la présence d'un dispositif mécanique à la base d'une trémie ralentit l'écoulement naturel. Dans ce cas la contrainte $\sigma_0(\theta)$ au niveau de la sortie ne peut s'annuler mais sa valeur n'est pas connue. Si on connaît $\sigma_0(\theta)$ le débit s'obtient à partir des expressions (2.38) et (2.39) dans lesquelles $f(0)$ et $f(\theta_p)$ se calculent à partir de (2.32). Soit q ce débit en écoulement freiné.

2.2.4.3 - CAS GÉNÉRAL

Lorsqu'on fait $\sigma_0(\theta) = 0$ le débit en écoulement freiné q devient maximal et égal à Q . L'expression de q constitue donc une formule générale. Il suffit de l'exprimer en fonction de Q pour y voir plus clair. La démarche consiste à évaluer d'abord le rapport q/Q tout en remarquant que $f(0)$ et $f(\theta_p)$ sont données par (2.32) pour q et (2.27) pour Q , et que $\sigma_0(\theta) = \sigma_a \cos(\theta)$. Il en résulte la formule générale du débit :

$$q = Q \left[1 - \frac{\sigma_a \cos \theta_p (P+1)}{X r_0} \frac{h_2(u)}{h_1(u)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.41)$$

Lorsque σ_a tend vers zéro, q tend vers le débit maximal Q .

Lorsque σ_a tend vers

$$\frac{h_1(u)}{h_2(u)} \frac{X r_0}{(P+1) \cos \theta_p}$$

alors, q tend vers 0.

La formule générale (2.37) permet aussi d'obtenir directement l'expression de q (cela revient à remplacer Q dans (2.41) par son expression)

$$q = 2 \left(\frac{2\pi}{3} \right)^m \rho l^{(1-m)} v_a J^{(1-m)} \left(1 - \cos^{\frac{3}{2}} \theta_p \right)^m \quad (2.42)$$

v_a se calcule à partir de (2.37)

La formule (2.41) ressemble à celle de JOHANSON [] explicitée au 1.4.2.5 pour laquelle si ff tend vers FF le débit s'annule. Mais la connaissance de q à partir de (2.41) ou (2.42) dépend de celle de σ_a normalement inconnue à moins de trouver une autre méthode pour la déterminer. Ces deux formules présentent malgré tout un intérêt particulier pour le dosage. En effet la valeur du débit est fixé selon la demande dans la chaîne de fabrication. Connaissant q on peut maintenant déterminer la contrainte σ_a à partir de (2.41) ou (2.42) puis $\sigma_o(\theta)$ à partir de (2.35) et par conséquent la distribution de vitesse à partir de (2.37).

2.2.5 - APPROCHE DE LA DISTRIBUTION DE VITESSE ET DE LA CONTRAINTE DEVELOPPEES PENDANT LE DOSAGE

Connaissant le débit q auquel se déroule le dosage, la contrainte moyenne axiale à la base de la trémie σ_a résulte de (2.41) ou (2.42) :

$$\sigma_a = \left(1 - \frac{q^2}{Q^2} \right) \frac{X r_0}{(P+1) \cos \theta_p} \frac{h_1(u)}{h_2(u)}$$

ou

$$\sigma_a = \frac{X r_0}{(P+1) \cos \theta_p} \frac{h_1(u)}{h_2(u)} + \left(\frac{3}{2\pi} \right)^{2m} \frac{q^2 Y (1 - \cos^{\frac{3}{2}} \theta_p)^{-2m} r_0^{-2m-2}}{4 \rho^2 (P-2m-2) (1J)^{(2-2m)} h_2(u)} \quad (2.43)$$

Dans ces expressions

Q s'obtient à partir de (2.38) ou (2.39) suivant la nature de la paroi

X , Y et P résultent de (2.22) ou (2.25) suivant la nature de la paroi

J est donné par (2.40)

La connaissance de σ_c entraîne celle de $\sigma_o(\theta)$ et celle de la charge qui s'exerce sur le tapis doseur. En substituant σ_a dans (2.37) par son expression (2.43), on déduit la fonction de distribution de vitesse $f(\theta)$ dans la trémie

$$f(\theta) = \left(\frac{3}{2\pi}\right)^m \frac{q(1 - \cos^{\frac{3}{2}\theta_p})^{-m}}{2p(1J)^{1-m}} \cos^{\frac{1}{2}\theta} \quad (2.44)$$

Cette formule peut s'obtenir directement à partir de (2.42) en remarquant que $f(\theta)$ s'écrit

$$f(\theta) = v_a \cos^{\frac{1}{2}\theta}$$

L'expression (2.44) montre que, lorsqu'on impose le débit du matériau, seuls les paramètres suivants interviennent dans le champ de vitesse : la géométrie de la trémie (θ_p , l , m), la masse volumique vrac ρ du matériau et la distance radiale r . En revanche si le matériau s'écoule librement à la sortie ($\sigma_a=0$) les autres paramètres du matériau interviennent (φ_e et φ_p).

Connaissant σ_a il devient aussi possible de connaître la répartition de la contrainte sur l'axe central ou sur la paroi de la trémie grâce à (2.17) qui peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} \sigma = & \frac{X}{P+1} r + \left[r^{-2(m+1)} - r^{-P} r_o^{P-2(m+1)} \right] \left[\sigma_o r_o^{2m+2} h_2(u) - \frac{X}{P+1} r_o^{2m+3} h_1(u) \right] \\ & + r^{-P} \left(\sigma_o r_o^P - \frac{X}{P+1} r_o^{P+1} \right) \end{aligned} \quad (2.45)$$

Pour les valeurs de la contrainte sur l'axe central X , Y et P s'obtiennent à partir de (2.20). Pour ses valeurs à la paroi X , Y et P se calculent à partir de (2.22) ou (2.25), suivant l'aspect de celle-ci (lisse ou rugueuse).

2.2.6 - ANALYSE DES RESULTATS

2.2.6.1 - VARIATION DU DEBIT EN FONCTION DE LA CONTRAINTE A LA SORTIE

Les figures 2.3.a,b,c, et d montrent que le débit d'écoulement décroît lorsque la contrainte moyenne à la base de la trémie augmente. Il existe une valeur critique de cette contrainte pour laquelle le débit s'annule donc il y a absence d'écoulement. La présence d'un dispositif de dosage à la base d'une trémie y induit justement une contrainte moyenne $\sigma_o(\theta)$. Celle-ci varie en fonction du débit de dosage.

Il apparaît sur les figures 2.3.a,b,c et d que ce dernier augmente lorsque les valeurs des paramètres suivant diminuent : l'angle de frottement interne effectif φ_e , l'angle de frottement à la paroi φ_p et l'angle d'inclinaison θ_p de la paroi par rapport à la verticale. Lorsque la contrainte moyenne à la sortie s'annule l'approche théorique prévoit un débit très fort notamment pour le cas d'une trémie bidimensionnelle (fig 2.3.b). On peut se poser la question si la contrainte à la sortie s'annule vraiment lors d'une vidange simple car les modèles utilisant cette hypothèse surestiment parfois le débit. Or il suffit qu'il existe une contrainte de l'ordre du kPa à la sortie pour que la valeur du débit décroisse énormément. On peut alors penser que la contrainte à la sortie peut être non nulle même lors d'une vidange simple. Seulement son ampleur dépend des propriétés d'écoulement du matériau. Ceci rejoint l'idée de JOHANSON (Cf 1.4.2.5) qui introduisait dans son modèle de débit un terme contenant les propriétés ff et FF du matériau. Ce terme tend vers zéro, de même pour le débit, lorsque le matériau est très difficile.

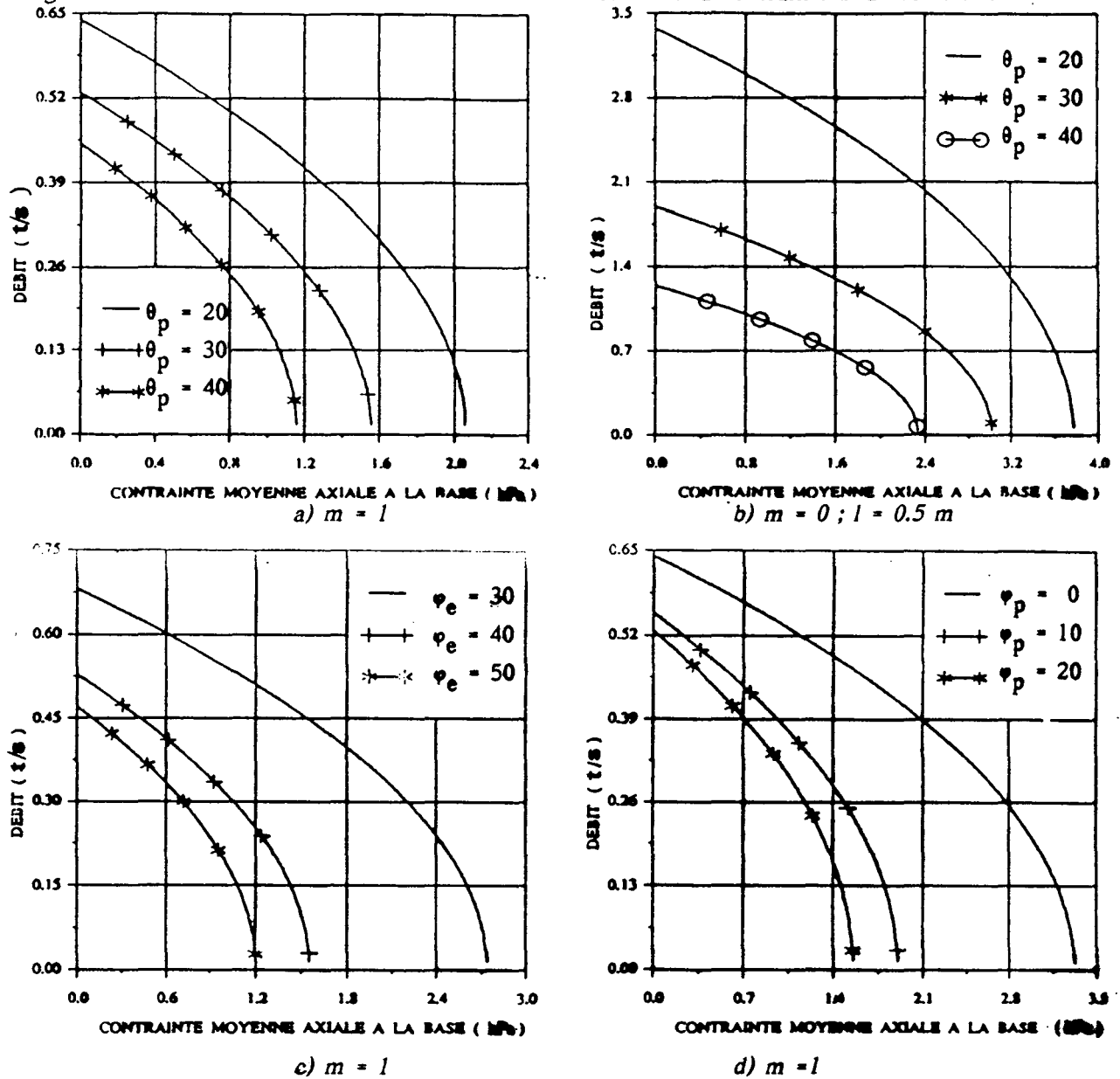
2.2.6.2 - DISTRIBUTION DE LA VITESSE DANS UNE TREMIE PENDANT LE DOSAGE

Les figures 2.4.a, b, c, d illustrent la formule (2.44) qui approche le champ de vitesse dans une trémie, en écoulement de masse établi, lorsqu'on fixe le débit. La répartition en amplitude de la vitesse dépend de la géométrie de la trémie (fig 2.4 a, b et c), de la valeur du débit (fig 2.4.d) et de la masse volumique vrac du matériau. Une confrontation de ce modèle simple de distribution de vitesse avec les résultats expérimentaux du chapitre 5 est effectuée au chapitre 6.

2.2.6.3 - REPARTITION DE LA CONTRAINTE SUR LA PAROI D'UNE TREMIE DOSEUSE

On considère toujours un écoulement en masse stationnaire. Les figures 2.5.a,b,c et d montrent les répartitions de la contrainte normale à la paroi d'une trémie, en fonction de quelques paramètres, pour un débit de 120 t/h. Elles découlent de la formule (2.45) pour laquelle la contrainte moyenne $\sigma_o(\theta)$ résulte des expressions (2.43) et (2.35). L'allure des courbes exhibe l'existence d'une zone de contrainte maximale entre la surface libre et le fond de la trémie. Ce maximum se déplace vers le haut lorsque l'angle de frottement interne effectif φ_e augmente (fig 2.5.c). Il se déplace vers le bas et diminue en amplitude lorsque l'angle d'inclinaison θ_p de la paroi augmente (fig 2.5.a,b). Il reste pratiquement au même niveau mais diminue en amplitude lorsque l'angle de frottement à la paroi croît (fig 2.5.d). Visiblement les niveaux de contrainte élevés s'obtiennent avec des matériaux à écoulement facile et des trémies à parois escarpées notamment les bidimensionnelles.

Figure 2.3 - Variation du débit d'écoulement en fonction de la contrainte à la base d'une trémie



Les valeurs des paramètres sont indiquées sur les figures lorsqu'ils varient sinon ils prennent les valeurs suivantes :

$$\varphi_p = 25^\circ$$

$$h^p = 2m$$

$$\varphi_e = 40^\circ$$

$$\rho = 1.5 \text{ t/m}^3$$

$$\theta_p = 30^\circ$$

$$D = 0.5 m$$

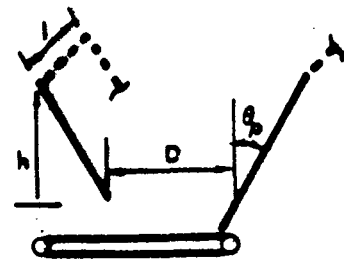
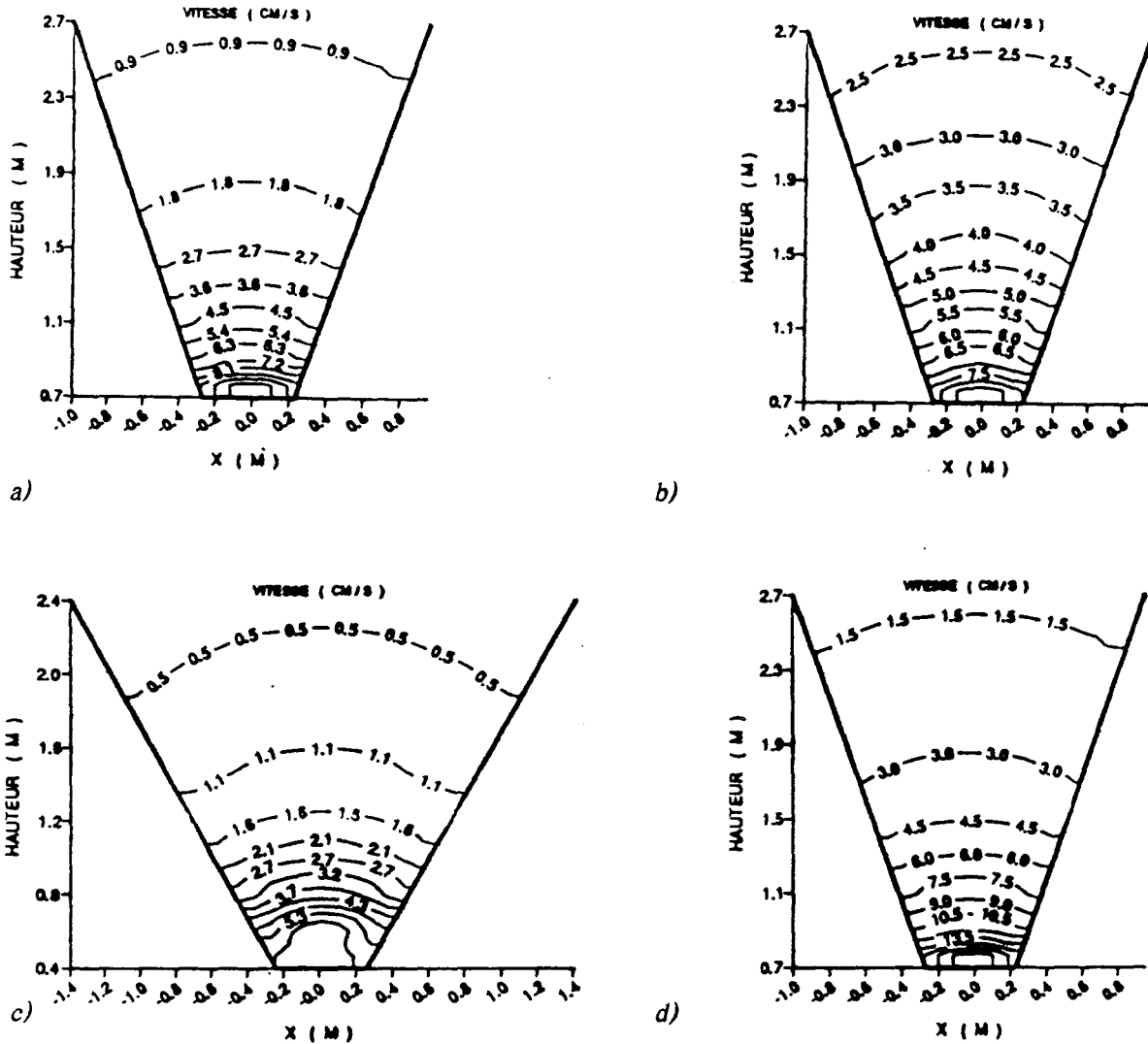
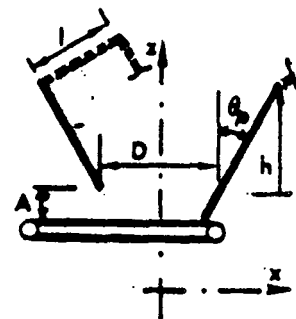


Figure 2.4 - Distribution de vitesse dans une trémie de dosage



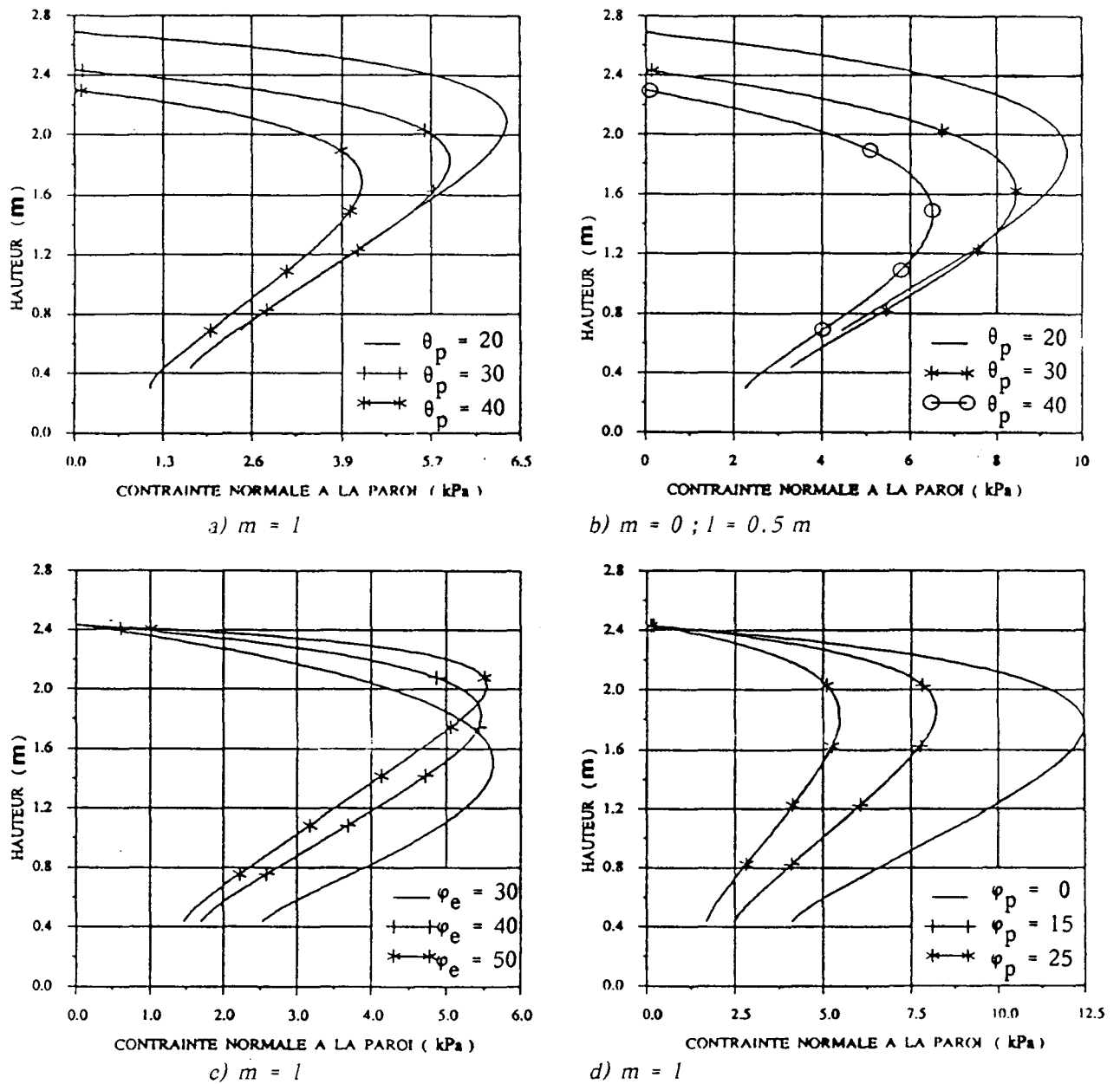
Variables	θ	m	q
Figures	(°)		(t/h)
a	20	1	120
b	20	0	120
c	30	1	120
d	20	1	200



Autres paramètres :

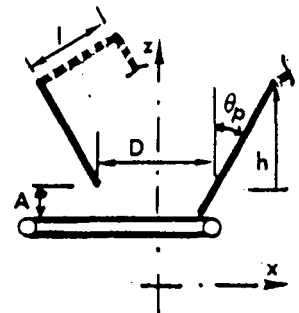
 $h = 2 \text{ m}$ $\rho = 1.5 \text{ t/m}^3$ $D = 0.5 \text{ m}$ $l = 0.5 \text{ m}$ pour la figure 2.4.b

Figure 2.5 - Répartition de la contrainte sur la paroi d'une trémie pendant l'écoulement



Les valeurs des paramètres qui varient sont indiquées sur les figures sinon ils prennent les valeurs suivantes :

$$\begin{aligned} \varphi_p &= 25^\circ & \varphi_e &= 40^\circ & \theta_p &= 30^\circ \\ p &= 1.5 \text{ t/m}^2 & h &= 2 \text{ m} & D &= 0.5 \text{ m} \end{aligned}$$



2.2.6.4 - SYNTHESE

L'approche théorique de la distribution de vitesse pendant l'écoulement radial en masse établi a montré la liaison entre le débit et la répartition de la contrainte à la base d'une trémie de dosage. Ainsi lorsqu'on impose le débit (car il s'agit de doser) on peut évaluer cette contrainte. Il en résulte un modèle simple qui approche la distribution de vitesse dans la trémie. Ce modèle contient les paramètres de géométrie de cette dernière ainsi que la masse volumique vrac du matériau. Il en découle également une approche du champ de contrainte dans la trémie dont on souligne l'utilité pour le dimensionnement du matériel vis à vis des efforts.

2.3 - FORMATIONS DE VOUTE ET DE CHEMINEE

Le calcul des valeurs de la fonction de distribution de vitesse $f(\theta)$ pendant l'écoulement en masse montre que la vitesse décroît du centre vers la paroi. Alors si la vitesse est nulle sur l'axe centrale tout le matériau ne doit pas normalement s'écouler. Cette remarque contribuera à établir les conditions de formation de voûte stable et d'écoulement en masse critique. A partir de l'expression (2.26), l'écriture de $f(\theta) = 0$ donne pour une surcharge nulle :

$$r_0 - \frac{\sigma_0 (P+1)}{X(1-u^{-P-1})} = 0 \quad (2.46)$$

avec

$$\lim_{P \rightarrow -1} \left(\frac{P+1}{1-u^{-P-1}} \right) = \frac{1}{\text{Log}u}$$

Soit D la dimension de l'orifice de sortie du matériau et h la hauteur de celui-ci ; alors :

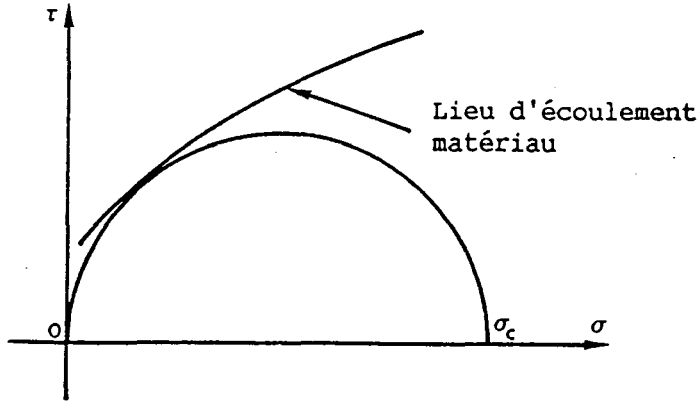
$$D = 2r_0 / \sin\theta_p$$

$$u^{-1} = 1 + \frac{2h \tan\theta_p}{D}$$

2.3.1 - FORMATION DE VOUTE STABLE

Lorsqu'une voûte stable se forme le mouvement du matériau se trouve bloqué, autrement dit $f(0)=0$. A la surface de la voûte la contrainte σ_r suivant le rayon r est évidemment nulle et la contrainte σ_θ devient principale et est égale, au minimum, à la résistance à la compression σ_c de la voûte (fig 2.6).

Figure 2.6 - Etat de contrainte à la surface libre d'une voûte



L'écriture du système

$$\begin{cases} f(0) = 0 \\ \sigma_\theta = 2\sigma_0 = \sigma_c \end{cases}$$

donne l'équation suivante :

$$f_v = D_v - \frac{\sigma_c (P_a + 1) \sin \theta_p}{\rho g X_a \left[1 - \left(1 + \frac{2h \tan \theta_p}{D_v} \right)^{P_a + 1} \right]} = 0 \quad (2.47)$$

avec $f_v = f_v(D_v, \theta_v, h, \rho, g, \varphi_e, \sigma_c, m)$

Lorsque la valeur de P tend vers -1 la fonction f_v s'écrit :

$$f_v = D_v + \frac{\sigma_c \sin \theta_p}{\rho g X_a \operatorname{Log} \left[1 + \frac{2h \tan \theta_p}{D_v} \right]}$$

Une résolution numérique de l'équation $f_v = 0$ permet de déterminer la dimension minimale D_v de l'orifice au-dessous de laquelle se produit une voûte stable. On remarque que D_v ne dépend pas de l'angle de frottement à la paroi φ_p . Cette même équation $f_v = 0$ peut aussi donner la valeur maximale θ_v de l'inclinaison de la paroi au delà de laquelle il y a voûte stable, connaissant la dimension de l'orifice D . Pour un matériau de caractéristiques données, la fonction f_v décrit une situation de voûte stable.

2.3.2 - ECOULEMENT EN MASSE CRITIQUE

L'écoulement en masse critique correspond à la valeur de $f(\theta)$ nulle juste à la paroi. Comme il peut s'agir d'une situation limite entre écoulement de masse et formation d'une cheminée de résistance σ_c et dont le pourtour se confond avec les parois, on écrit aussi que $\sigma_\theta = \sigma_c$ à la paroi.

En récapitulant :

$$\begin{cases} f(\theta_p) = 0 \\ \sigma_{\theta_p} = 2\sigma_p = \sigma_c \end{cases}$$

Ce système engendre l'équation suivante :

$$f_m = D_m - \frac{\sigma_c(P+1) \sin\theta_m}{X \left[1 - \left(1 + \frac{2h \tan\theta_m}{D_m} \right)^{P+1} \right]} = 0 \quad (2.48)$$

dans laquelle X et P s'obtiennent par (2.25) ou (2.22) selon que la paroi est lisse ou non.

$$f_m = f_m(D_m, \theta_m, h, \rho, g, \varphi_e, \varphi_p, \sigma_c, m)$$

Lorsque P tend vers -1, f_m s'écrit

$$f_m = D_m + \frac{\sigma_c \sin\theta_m}{X \text{Log} \left[1 + \frac{2h \tan\theta_m}{D_m} \right]}$$

La fonction f_m décrit une situation d'écoulement en masse critique. L'équation $f_m = 0$ permet de déterminer la dimension critique D_m (resp. l'angle d'inclinaison critique θ_m) pour avoir un écoulement en masse connaissant l'angle d'inclinaison θ_p (resp. la dimension de l'orifice D) et ce pour un matériau de caractéristiques données.

2.3.3 - FORMATION DE CHEMINEE

Lorsque la cheminée se forme, une zone centrale se met en mouvement donc $f(\theta) \neq 0$, tandis que le voisinage des parois reste immobile donc $f(\theta) = 0$. La frontière de la zone en mouvement délimite la cheminée. On va essayer, dans cette partie, de trouver la droite qui ajuste le mieux cette frontière initiale de la cheminée à partir des conditions à la sortie. En effet le matériau en rétention y matérialise une portion de voûte qui s'oppose à la déformation par sa résistance σ_c . Pour un matériau de caractéristiques données et une trémie d'ouverture à la base D donnée, l'angle d'inclinaison approximative de la cheminée initiale s'obtient donc en résolvant le système :

$$\begin{cases} f_m(\theta) = 0 \\ \sigma_0 = 2\sigma_c \end{cases}$$

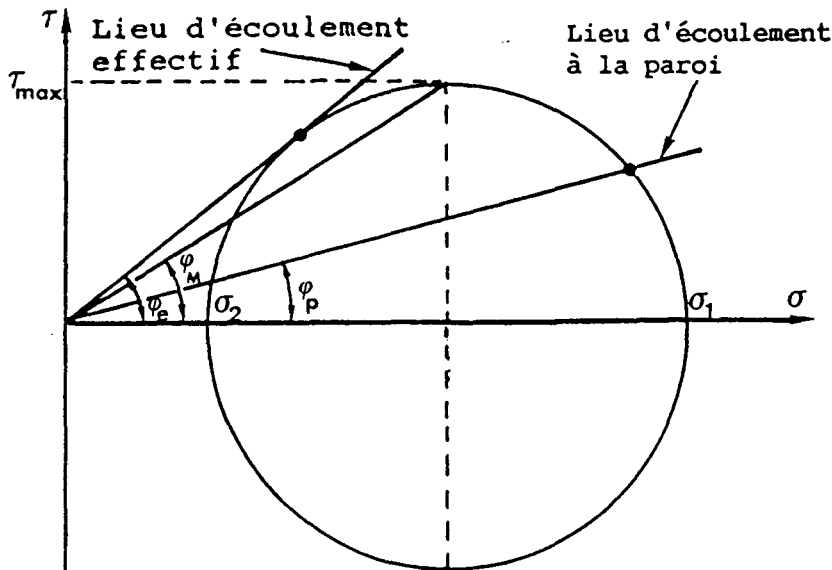
Cette façon de déterminer la limite initiale de la cheminée suscite deux remarques :

- la cheminée correspond à une situation intermédiaire entre une formation de voûte stable et un écoulement de masse.

- le matériau dans la cheminée s'écoule en masse donc la frontière de celle-ci devient une paroi fictive. Le frottement sur cette dernière n'est pas égal au frottement interne du matériau mais égal au frottement maximal φ_M mobilisable sur une paroi (pendant l'écoulement) illustrée dans la figure 2.7. Cette remarque amène à distinguer, ci-dessous, le cas des parois très rugueuses telles que $\varphi_p \geq \varphi_M$. la figure 2.7 donne une équation qui permet de déterminer φ_M :

$$\varphi_M = \text{Arctan} (\sin \varphi_e) \quad (2.49)$$

Figure 2.7 - Frottement maximal mobilisable φ_M sur la paroi d'une trémie pendant l'écoulement



Considérons un matériau de caractéristiques données et une trémie qui n'entretient pas de voûte stable, alors les cas suivants sont possibles :

2.3.3.1 - CAS 1 : $\varphi_p < \varphi_M$

- Supposons connue la dimension de l'orifice de sortie D et que l'angle d'inclinaison θ_p de la paroi reste à définir. Il faut d'abord déterminer à partir de (2.48) l'angle critique θ_m de la paroi pour avoir un écoulement en masse en faisant :

$$f_m(D, \theta_m, h, \rho, g, \varphi_e, \varphi_p, \sigma_c, m) = 0$$

connaissant θ_m :

- . si $\theta_p \leq \theta_m$ il y a écoulement en masse
- . si $\theta_p > \theta_m$ il y a écoulement en cheminée

L'angle d'inclinaison θ_{ch} de la cheminée initiale s'obtient en résolvant :

$$f_m(D, \theta_{ch}, h, \rho, g, \varphi_e, \varphi_M, \sigma_c, m) = 0 \quad (2.50)$$

- Supposons connu l'angle d'inclinaison θ_p de la paroi et que la dimension de l'orifice de sortie D reste à définir. La démarche consiste à déterminer la dimension critique D_m pour avoir l'écoulement en masse en résolvant :

$$f_m(D_m, \theta_p, h, \rho, g, \varphi_e, \varphi_p, \sigma_c, m) = 0$$

Connaissant D_m :

- . Si $D \geq D_m$ il y a écoulement en masse
- . Si $D < D_m$ il y a écoulement en cheminée

L'inclinaison θ_{ch} de la cheminée initiale s'obtient en résolvant l'équation (2.50)

2.3.3.2 - CAS 2 : $\varphi_p \geq \varphi_M$ (PAROI TRES RUGUEUSE)

- Supposons connue la dimension de l'orifice de sortie D et que l'angle d'inclinaison θ_p de la paroi reste à définir. Le frottement maximal mobilisable sur la paroi ou à la frontière de la cheminée vaut φ_M . Donc on détermine d'abord à partir de (2.48), l'angle d'inclinaison critique de la paroi θ_m pour avoir l'écoulement en masse :

$$f_m(D, \theta_m, h, \rho, g, \varphi_e, \varphi_M, \sigma_c, m) = 0 \quad (2.51)$$

Connaissant θ_m :

- . si $\theta_p \leq \theta_m$ il y a écoulement en masse
- . si $\theta_p > \theta_m$ il y a écoulement en cheminée

Cette cheminée s'incline de $\theta_{ch} = \theta_m$ par rapport à la verticale.

- Supposons connu l'angle d'inclinaison θ_p de la paroi et que la dimension de l'orifice de sortie D reste à définir. On commence par déterminer la dimension critique D_m pour avoir l'écoulement en masse en résolvant :

$$f_m(D_m, \theta_p, h, \rho, g, \varphi_e, \varphi_M, \sigma_c, m) = 0$$

- Connaissant D_m :

- . si $D \geq D_m$ il y a écoulement en masse
- . si $D < D_m$ il y a écoulement en cheminée

L'inclinaison θ_{ch} de cette cheminée résulte de la résolution de l'équation :

$$f_m(D, \theta_{ch}, h, \rho, g, \varphi_e, \varphi_M, \sigma_c, m) = 0 \quad (2.52)$$

Les deux cas discutés ci-dessus montrent que la formation d'une cheminée au début de l'écoulement dépend l'angle d'inclinaison θ_p de la trémie et de l'angle de frottement à la paroi. Par contre la taille de cette cheminée initiale ne dépend pas de ces deux paramètres.

2.3.4 - ANALYSE DES RESULTATS

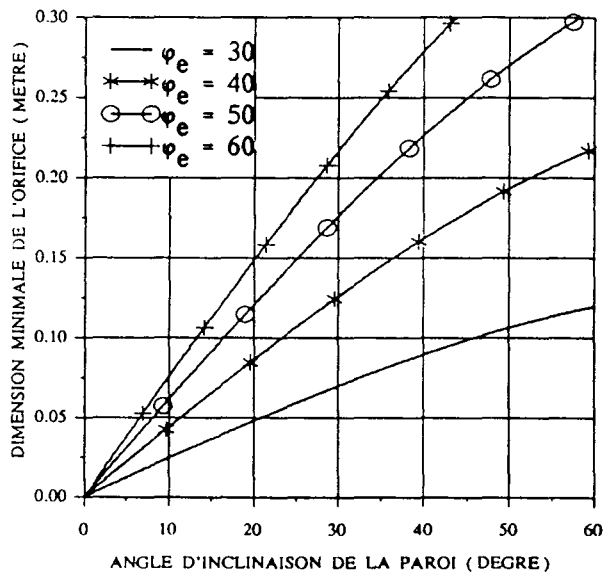
2.3.4.1 - PREDICTION DE LA GEOMETRIE CRITIQUE POUR LA FORMATION DE VOUTE STABLE

Les figures 2.8.a,...f montrent les variations de la dimension minimale de l'orifice en fonction de quelques paramètres liés à la trémie et au matériau.

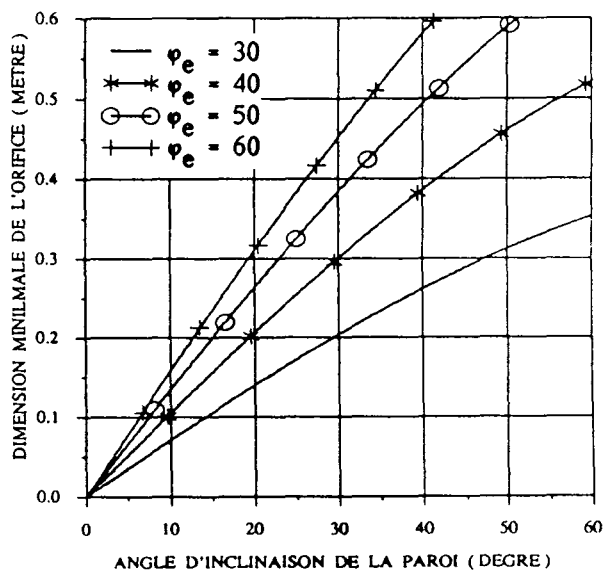
La dimension minimale de l'orifice D_v ne dépend pas de l'angle de frottement à la paroi. Elle augmente avec l'angle de frottement interne effectif φ_e , l'angle d'inclinaison de la paroi θ_p et la stabilité du matériau σ_c . Elle diminue lorsque la masse volumique vrac du matériau augmente. Ces différentes variations vont dans le bon sens. Les figures 2.8.a,...d montrent qu'il existe un rapport globalement de 2 entre la valeur de D_v pour une trémie tronconique ($m=1$) et une trémie bidimensionnelle. Pour la détermination de la dimension critique de l'orifice de vidange, les différents auteurs cités au 1.3.3 (sauf LENCZNER) montraient que ce rapport vaut 2. La dimension minimale D_v tend vers zéro lorsque la paroi de la trémie s'approche de la verticale. Cela semble être le point discutable de notre modèle car une voûte peut se former dans un tube vertical à paroi très rugueuse lorsque le matériau est très cohérent (Cf [29]). La figure (2.8.e) montre que D_v croît linéairement et assez rapidement avec la stabilité σ_c du matériau d'où l'importance de ce paramètre. La figure (2.8.f) souligne la difficulté à faire passer les produits de faible masse volumique vrac (notamment dans le domaine des poudres) à travers les petites ouvertures. Lorsqu'on maintient la stabilité σ_c constante la dimension minimale D_v ne varie pratiquement pas avec la hauteur h du matériau. Mais cette courbe $D_v(h)$ ne présente pas beaucoup d'intérêt. En effet si la hauteur du

matériau augmente, le degré de consolidation du matériau (donc σ_c) évolue ne serait-ce que jusqu'à une certaine valeur où il se maintient stable. Autrement dit, on ne peut pas varier h sans varier σ_c , par contre la réciproque reste valable. Cette remarque s'applique aussi aux parties 2.3.4.2 et 2.3.4.3 ci-dessous. La formule (2.47) permet aussi de déterminer les valeurs maximales θ_v de l'inclinaison de la paroi au-delà de laquelle il se produit une voûte stable connaissant la dimension de l'orifice D .

Figure 2.8 - Dimension minimale à la base d'une trémie



a) $m = 1$



b) $m = 0$

Les valeurs des paramètres sont indiquées sur les figures lorsqu'ils varient, sinon ils prennent les valeurs suivantes :

$$\theta_p = 30^\circ \quad h = 2 \text{ m} \quad \rho = 1.5 \text{ t/m}^3 \quad \sigma_c = 4 \text{ kPa}$$

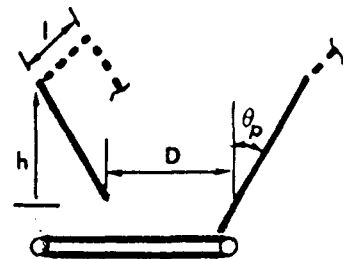
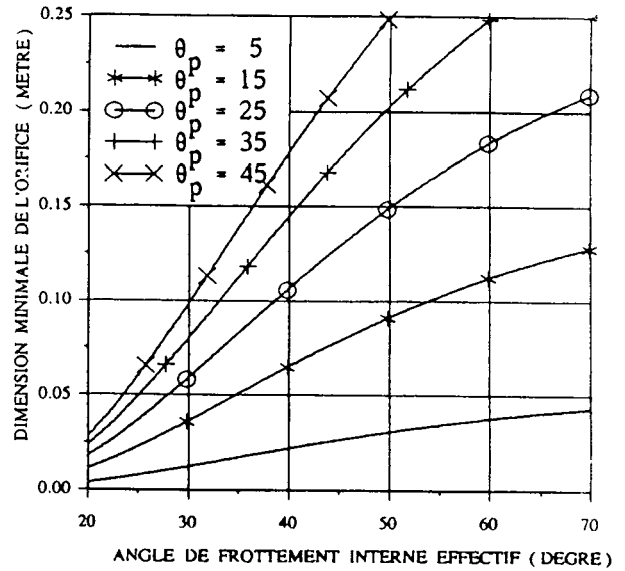
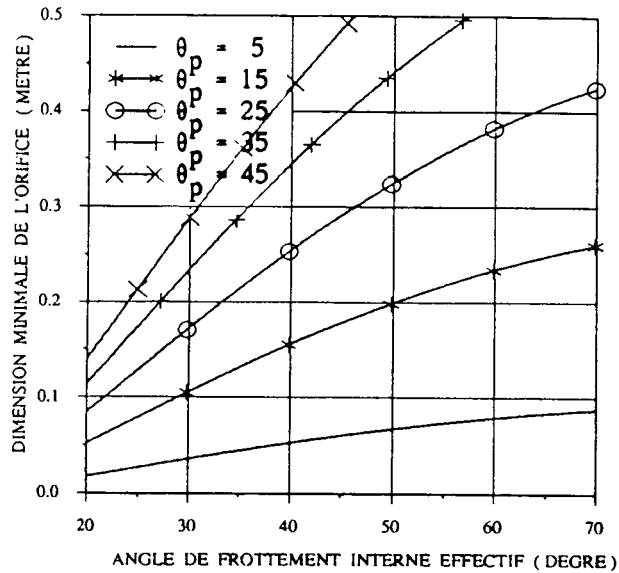
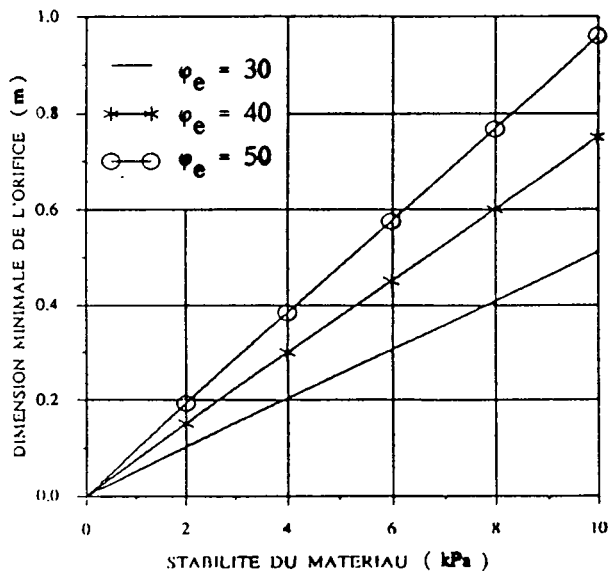
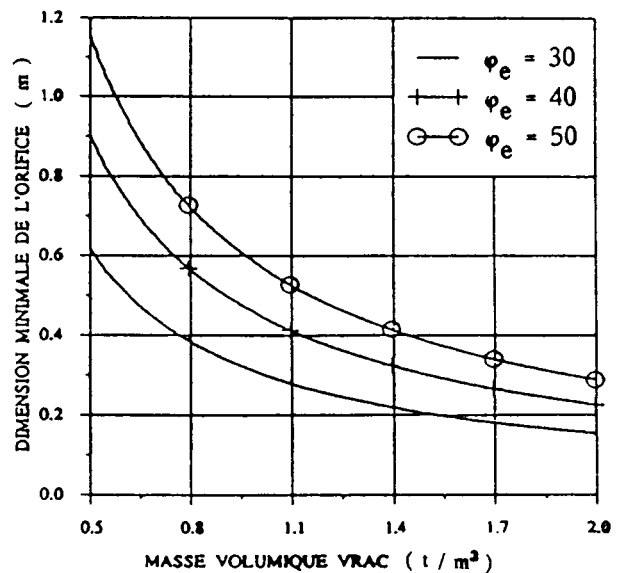
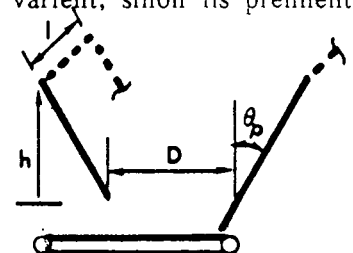


Figure 2.8 - Dimension minimale à la base d'une trémie (suite)

c) $m = 1$ d) $m = 0$ e) $m = 1$ f) $m = 1$

Les valeurs des paramètres sont indiquées sur les figures lorsqu'ils varient, sinon ils prennent les valeurs suivantes :

$$\theta_p = 30^\circ \quad h = 2 \text{ m} \quad \rho = 1.5 \text{ t/m}^3 \quad \sigma_c = 4 \text{ kPa}$$



2.3.4.2 - PREDICTION DE LA GEOMETRIE CRITIQUE POUR L'ÉCOULEMENT EN MASSE

Les figures 2.9.a,...,h montrent l'évolution de la géométrie d'une trémie en fonction des propriétés d'écoulement du matériau pour une situation d'écoulement en masse critique.

Vis-à-vis des paramètres θ_p , σ_c et ρ (figures 2.9.a,b,d,e) la dimension critique D_m (pour l'écoulement en masse) a les mêmes sens de variation que la dimension critique D_v (pour la voûte stable). Il faut toutefois signaler que logiquement D_m est supérieure à D_v et que l'allure des courbes $D_m(\theta_p)$ diffère de celle des courbes $D_v(\theta_p)$.

De plus le rapport entre la dimension D_m d'une trémie tronconique et celle d'une trémie bidimensionnelle (fig 2.9.a,b) devient nettement inférieur à 2 comparativement au cas de D_v . La figure 2.9.c montre que l'écoulement en masse des produits de faible masse volumique vrac ne peut avoir lieu qu'avec des trémies de grandes ouvertures de sortie ou de parois presque verticales.

Il en est de même pour les produits de grande stabilité σ_c (fig 2.9.d). Par contre lorsque σ_c tend vers zéro la méthode semble très optimiste car la dimension de l'ouverture tend vers zéro et l'inclinaison de la paroi tend vers $(\pi/2 - \varphi_p)$ c'est à dire le cas idéal. Ceci semble s'expliquer par le fait que la granulométrie des grains ne contribue pas dans le modèle. Ainsi ce dernier ne peut pas prévoir un éventuel blocage de l'écoulement dû à la voûte de type géométrique. Les figures 2.9.e,f montrent que si l'angle de frottement interne effectif augmente, il faut soit augmenter la taille de l'orifice de sortie, soit diminuer l'inclinaison de la paroi par rapport à la verticale, pour avoir l'écoulement en masse.

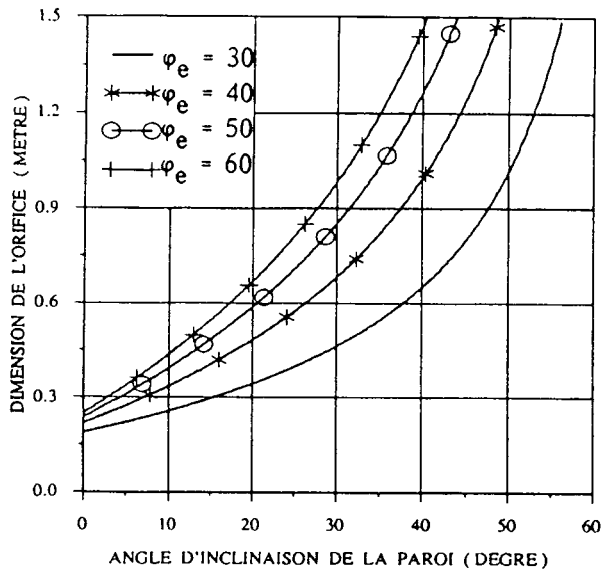
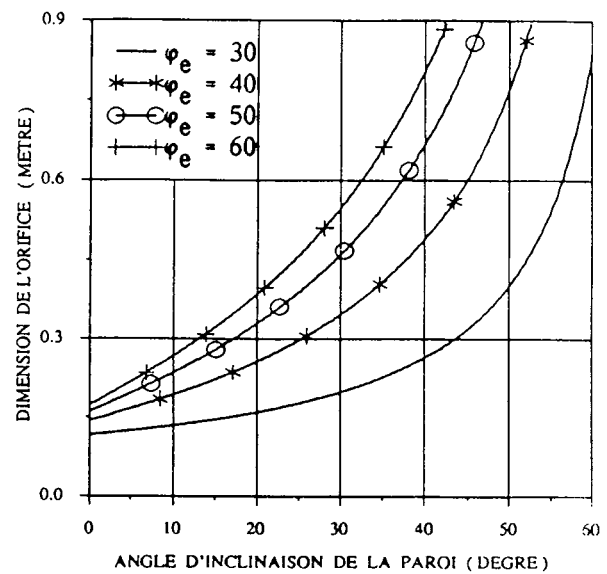
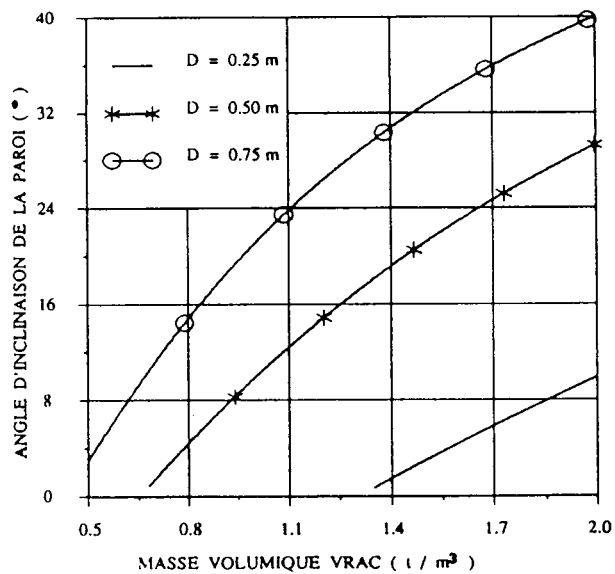
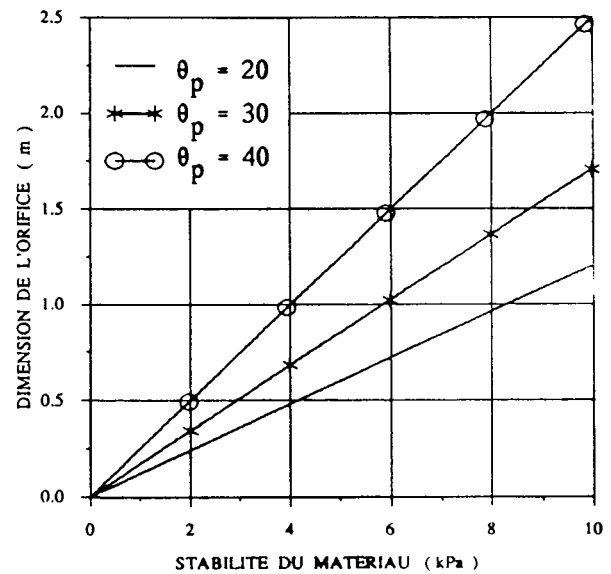
Les figures 2.9.g,h montrent comment les dimensions critiques D_m et θ_m varient avec l'angle de frottement à la paroi φ_p : lorsque celui-ci augmente :

- D_m croît, passe par un maximum puis décroît,
- θ_m décroît, passe par un minimum puis croît.

Ces extremums correspondent à l'angle de frottement maximal mobilisable à la paroi pendant l'écoulement φ_M défini par la formule (2.49) et qui a servi à expliquer la formation d'une cheminée au début d'un écoulement (Cf 2.3.3). Lorsque φ_p dépasse φ_M le matériau au voisinage de la paroi se trouve à l'état actif ($\sigma_\theta < \sigma_p$) et tend à s'immobiliser donc les valeurs de D_m et de θ_m lues sur les courbes ne sont plus valables (fig 2.9.g,h). Il se forme alors une cheminée sauf sous certaines conditions évoquées au 2.3.3.2. Il faut remarquer qu'à cause des différentes hypothèses simplificatrices adoptées, les valeurs de φ_M lues sur les courbes (fig 2.9 g,h) se trouvent soit légèrement inférieures, soit légèrement supérieures à sa valeur exacte déterminée par la formule (2.49). Avec cette formule φ_M vaut :

- * 26,6° pour $\varphi_e = 30^\circ$
- * 32,7° pour $\varphi_e = 40^\circ$
- * 37,5° pour $\varphi_e = 50^\circ$
- * 40,1° pour $\varphi_e = 60^\circ$

Figures 2.9 - Géométrie d'une trémie pour l'écoulement en masse critique

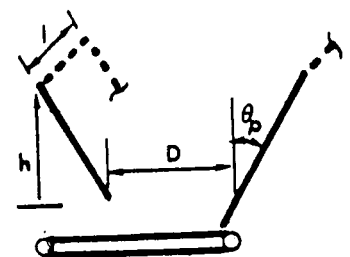
a) $m = 1$ b) $m = 0$ c) $m = 1$ d) $m = 1$

Les valeurs des paramètres sont indiquées sur les figures lorsqu'ils varient sinon ils prennent les valeurs suivantes :

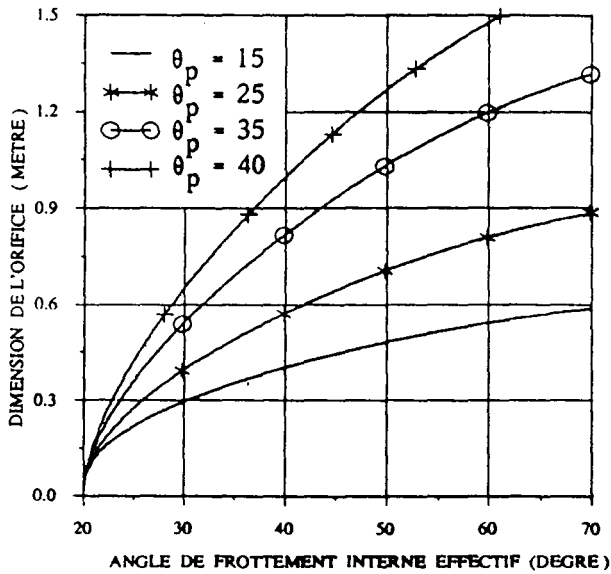
$$\begin{aligned}\theta_p &= 30^\circ \\ \rho_p &= 1.5 \text{ t/m}^3 \\ \phi_e &= 40^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\phi_p &= 20^\circ \\ \sigma_c &= 4 \text{ kPa}\end{aligned}$$

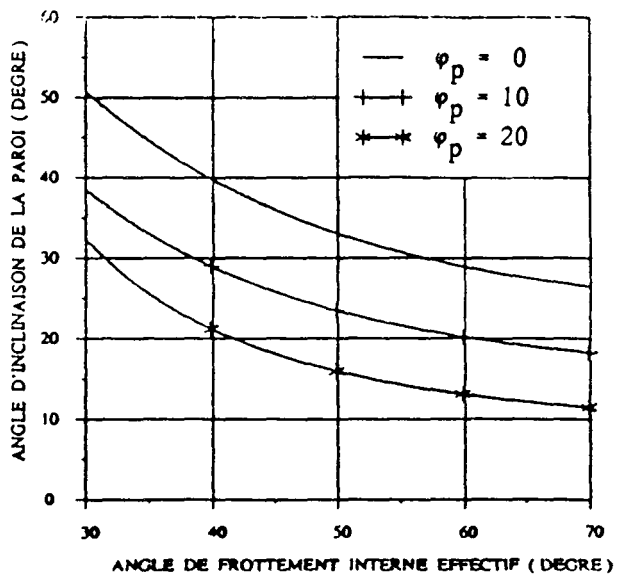
$$\begin{aligned}D &= 0.5 \text{ m} \\ h &= 2 \text{ m}\end{aligned}$$



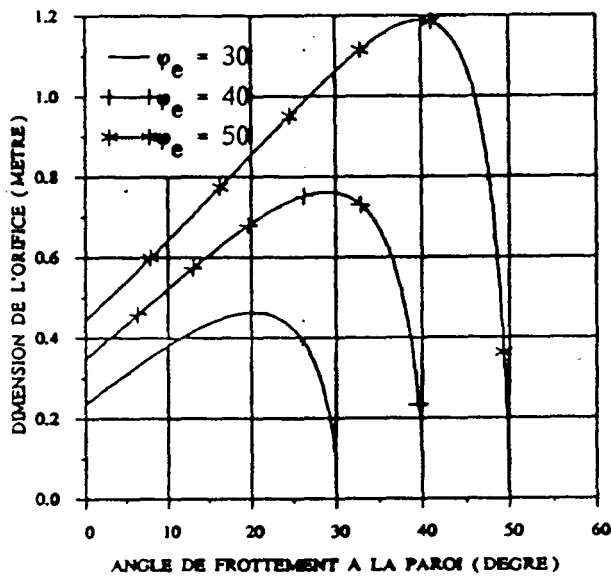
Figures 2.9 - Géométrie d'une trémie pour l'écoulement en masse critique (suite)



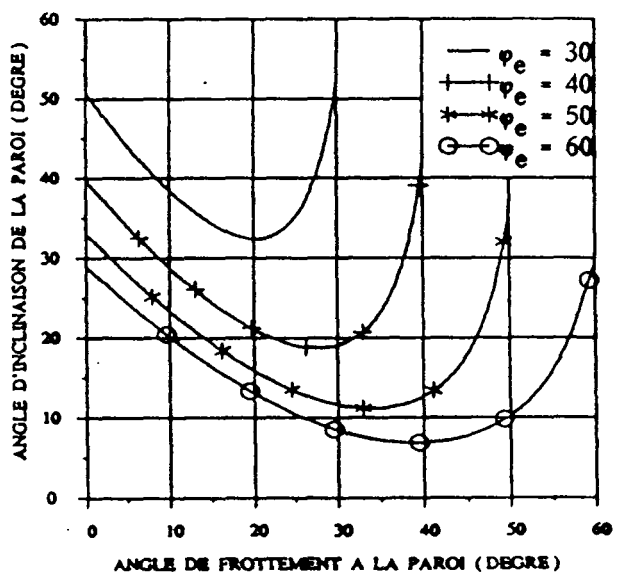
e)



f)



g)



h)

Les valeurs des paramètres sont indiquées sur les figures lorsqu'ils varient sinon ils prennent les valeurs suivantes :

$$\theta_p = 30^\circ$$

$$\rho = 1.5 \text{ t/m}^3$$

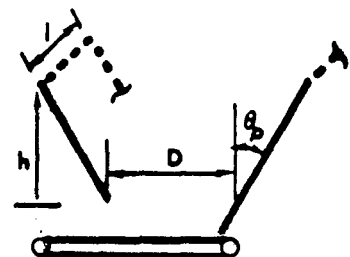
$$m = 1$$

$$\phi_p = 20^\circ$$

$$\phi_c = 4 \text{ kPa}$$

$$D = 0.5 \text{ m}$$

$$h = 2 \text{ m}$$



Il est possible de rattraper le décalage en jouant sur la valeur du coefficient n (pris jusqu'ici égal à 1) affecté à la formule (2.24) de $(d\phi/d\theta)$. Néanmoins le choix de n nécessite une étude de plusieurs résultats.

2.3.4.3 - APPROCHE DE LA FRONTIERE DE LA CHEMINEE AU DEBUT DE L'ÉCOULEMENT

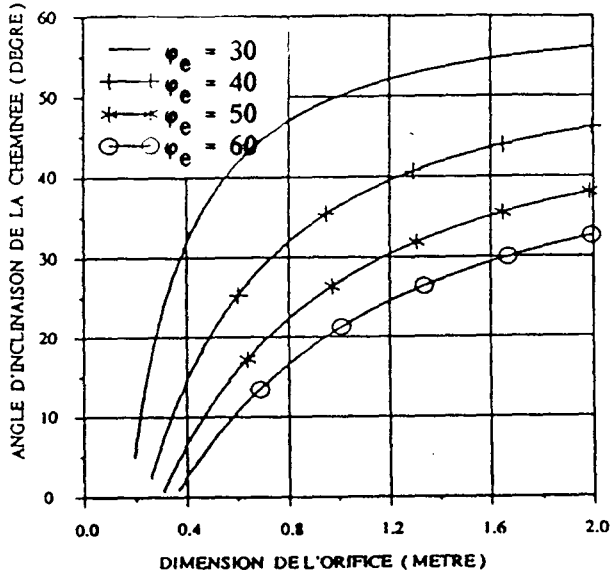
On considère qu'il se forme une cheminée (en choisissant $\theta_p > \theta_m$) et on se propose d'ajuster la frontière initiale de cette cheminée par une droite inclinée de θ_{ch} par rapport à la verticale. Les figures 2.10.a,b,c,d montrent les variations de θ_{ch} en fonction des caractéristiques du matériau et de la trémie.

Il a été montré que la taille de la cheminée ne dépend ni de l'angle d'inclinaison de la paroi, ni de l'angle de frottement à la paroi. Il convient d'établir la comparaison de figures 2.10.a,b,c,d avec les figures 2.9.a,d,f,h. L'angle d'inclinaison de la cheminée θ_{ch} varie dans le même sens que θ_m (pour l'écoulement en masse) vis-à-vis des paramètres D , ρ , σ_c et φ_e . On remarque aussi que la différence entre les valeurs de θ_{ch} et celles de θ_m est faible lorsque φ_e (resp. σ_c) est faible mais elle s'accroît lorsque φ_e (resp. σ_c) augmente. Cela semble normale car un matériau facile forme une cheminée plus large qu'un matériau difficile. Compte tenu de la remarque faite ci-dessus à propos des valeurs calculée et exacte de φ_M , la valeur de θ_{ch} calculées peuvent être légèrement soit au-dessus soit au-dessous de sa valeur exacte.

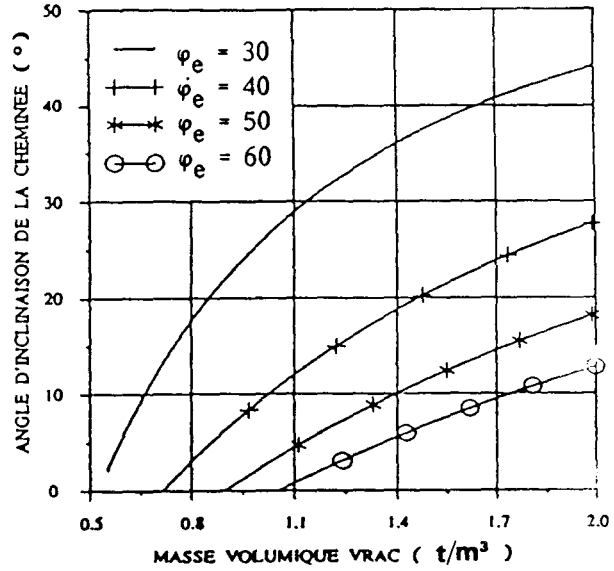
2.3.4.4 - SYNTHÈSE

L'étude qui vient d'être réalisée montre que la formation de voûte stable, la formation de cheminée et l'écoulement en masse s'appuient sur le même fondement théorique. Seulement leurs conditions de formation dépendent des caractéristiques du matériau et de la trémie. La formation de cheminée représente une situation intermédiaire entre les deux autres. La considération des frontières entre ces trois phénomènes permet de définir deux géométries critiques d'une trémie : celle qui détermine la limite de la voûte stable (dimension minimale) et celle qui détermine la limite de l'écoulement en masse. Les fonctions qui décrivent ces deux états critiques permettent d'expliquer la formation de cheminée en fonction des caractéristiques du matériau et de la trémie. Afin d'approcher la frontière de la cheminée à partir des conditions à la sortie, elle a été considérée comme la paroi d'une trémie fictive où le matériau se frotte avec l'angle φ_M maximal mobilisable sur une paroi (pendant l'écoulement) et s'écoule en masse. Cette démarche entraîne que la taille de la cheminée initiale ne dépend ni de l'angle d'inclinaison de la paroi, ni de l'angle de frottement à la paroi. La dimension critique pour la voûte stable ne dépend pas de l'angle de frottement à la paroi tandis que celle pour l'écoulement en masse intègre tous les paramètres. Le calcul des dimensions critique d'une trémie et l'approche de la frontière de la cheminée initiale donnent des résultats cohérents lorsqu'on fait varier les différents paramètres du matériau (des résultats complémentaires sont fournis sur la figure b.1 de l'annexe B). Toutefois des confrontations avec des résultats expérimentaux et d'autres travaux sont nécessaires et vont être effectuées au chapitre 6.

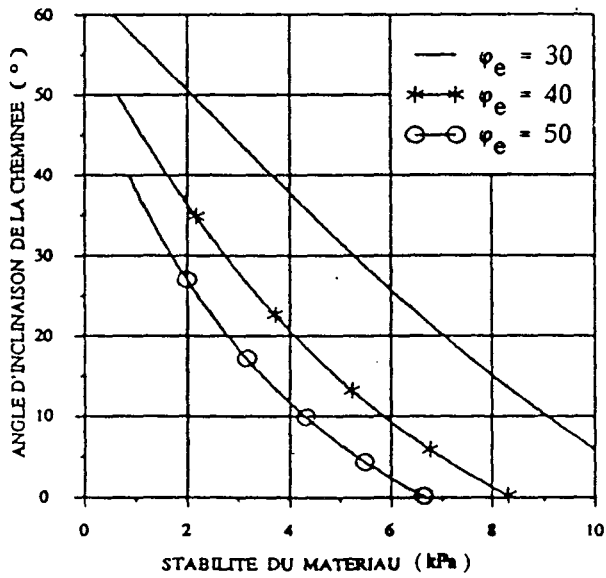
Figures 2.10 - Prévision de l'inclinaison de la cheminée au début de l'écoulement



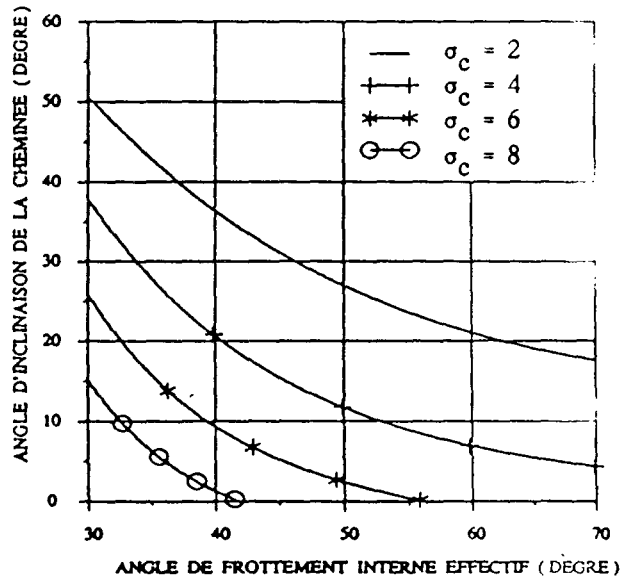
a)



b)



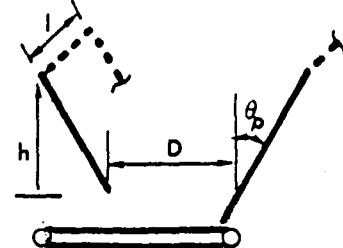
c)



d)

Les paramètres sont indiqués sur la figure lorsqu'ils varient, sinon ils prennent les valeurs suivantes:

$$\rho = 15 \text{ t/m}^3 \quad d = 0.5 \text{ m} \quad h = 2 \text{ m} \quad \sigma_c = 4 \text{ kPa} \quad m = 1$$



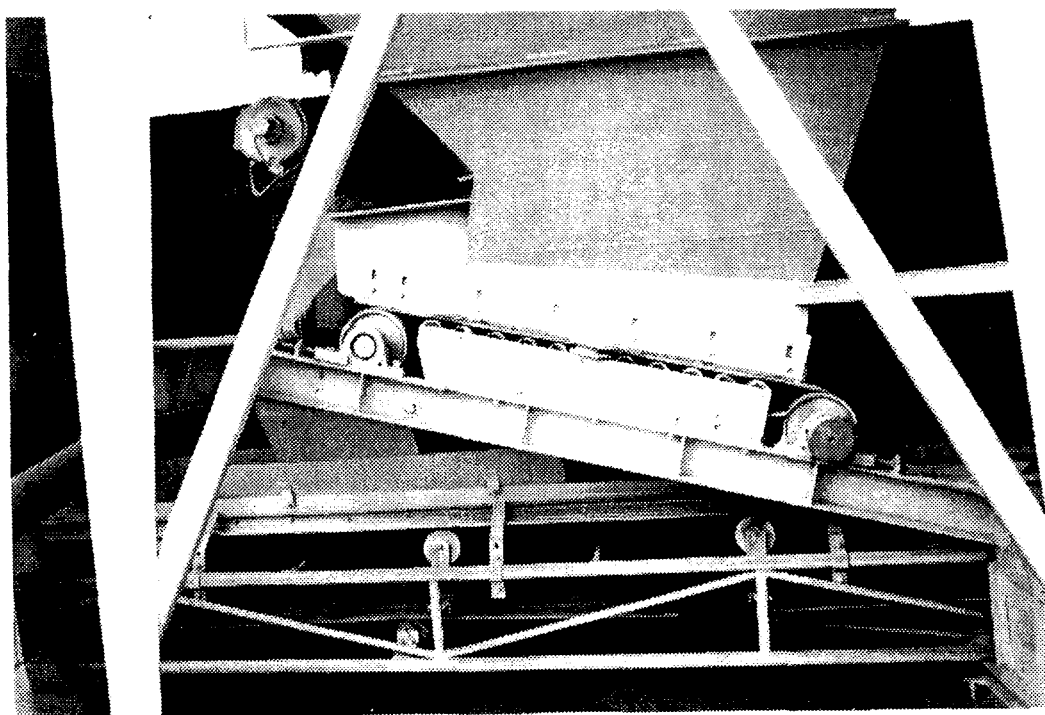
2.4 - LE DISPOSITIF DE DOSAGE DES GRANULATS

Les distributeurs à courroie, installés à la base des trémies, servent généralement au dosage des granulats et des pulvérulents humides. Ce dispositif de dosage (photo 2.1) doit d'abord, supporter la charge due au contenu de la trémie augmentée du poids du matériau qui repose déjà sur le tapis. Ensuite il doit évacuer le matériau conformément au débit demandé avec le meilleur rendement énergétique. Souvent les calculs sont effectués sans prendre en compte les influences de la géométrie au niveau de la zone d'extraction et de l'installation du dispositif de dosage. L'étude menée récemment par RADEMACHER [71] montrait ces influences. En étudiant l'équilibre du matériau situé entre la zone d'extraction et le tapis il déterminait le coefficient de frottement mobilisé entre le tapis et le matériau, évaluait la performance du dispositif de dosage en consommation d'énergie et regardait les influences sur ces deux paramètres de la géométrie à la base de la trémie. L'étude qui va suivre s'appuie sur les idées de RADEMACHER en ce qui concerne l'étude des influences de la zone d'extraction. Elle introduit de plus l'écoulement axisymétrique et étudie aussi les influences de la géométrie de la trémie ainsi que des caractéristiques des matériaux sur la conception du dispositif de dosage. L'approche établie au 2.25 permet en effet de déterminer la charge au tapis en fonction des paramètres du matériau et de la trémie. Ainsi l'ensemble "matériau + trémie + dispositif de dosage" forme un tout dans la conception.

2.4.1 - EFFORTS MOBILISES DANS LA ZONE D'EXTRACTION

Pendant l'extraction, il se forme à la base de la trémie une surface de rupture, siège de cisaillement "matériau-matériau". On considère par raison de commodité que cette surface notée Σ_1 , est plane. La figure 2.11 montre les différents efforts mobilisés durant l'extraction en isolant le matériau compris entre le plan de rupture Σ_1 et le tapis extracteur.

Photo 2.1 - Dispositif de dosage d'une trémie à extraction



2.4.1.1 - CHARGE EXERCEE PAR LE CONTENU DE LA TREMIE

L'effort F_1 qui s'exerce sur le plan de rupture fait avec celui-ci l'angle de frottement interne effectif φ_e . Sa composante verticale F s'obtient à partir de la contrainte exercée par le matériau au-dessus de ce plan. Il s'agit de la contrainte $\sigma_0(\theta)$ déterminée au 2.2.5 en considérant que la sortie du matériau se fait à partir de ce dernier. Comme un état d'équilibre limite passif règne pendant l'écoulement, on suppose que la contrainte verticale σ_{V0} agissant sur le plan de rupture est égale à la contrainte principale mineure.

Suivant le sens de l'extraction :

$$\sigma_{V0}(\theta) = (1 - \sin \varphi_e) \sigma_0(\theta) = \frac{2}{k+1} \sigma_a \cos \theta \quad (2.53)$$

Dans le sens perpendiculaire à l'écoulement on suppose que σ_{V0} reste constante et est égale à sa valeur donnée par (2.53). σ_a découle de l'expression (2.44) avec r_0 variable sur le plan de rupture (noté alors r).

La force F s'écrit :

$$F = \int_{\Sigma_1} dF = \int_{\Sigma_1} \sigma_{V0}(\theta) d\Sigma_1$$

Les détails du calcul de F figurent dans l'annexe A.2. Son expression finale s'écrit :

$$F = \rho g e^{2+m} l^{1-m} H \quad (2.54)$$

l'expression de H se trouve en annexe A.2, formule (a.23). e et l désignent respectivement l'épaisseur de veine (prise égale à l'ouverture de trappe A) et l'épaisseur de la trémie lorsqu'elle est bidimensionnelle.

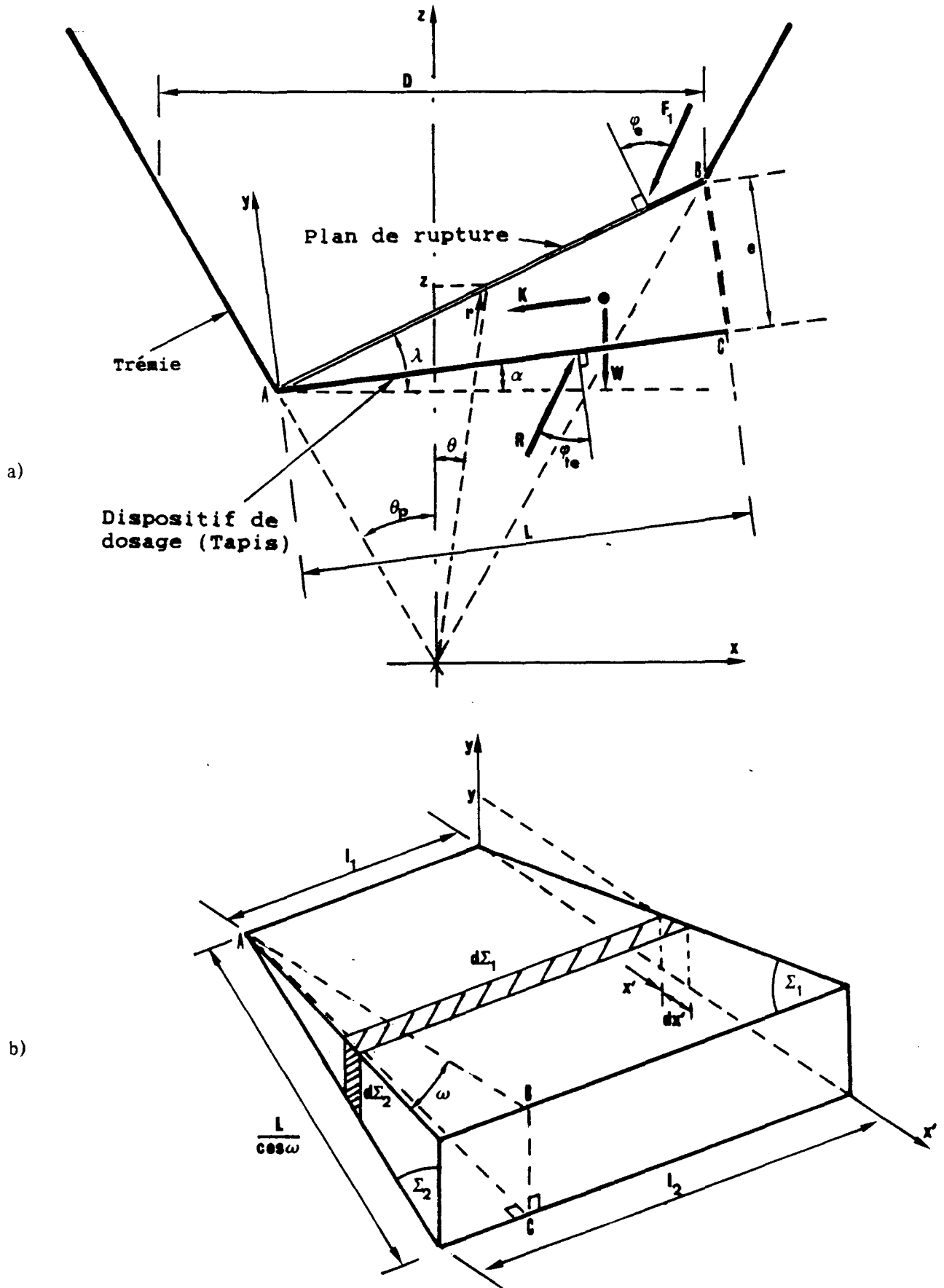
2.4.1.2 - POIDS DU MATERIAU SITUE ENTRE LE PLAN DE RUPTURE ET LE TAPIS

Le calcul, effectué à l'annexe A.4, ne prend pas en compte le poids du matériau transporté par le tapis après l'orifice de sortie et aboutit au résultat suivant :

$$W = \rho g e^{2+m} l^{1-m} V \quad (2.55)$$

L'expression de V figure en annexe A.4, formule (a.25)

Figure 2.11 - Efforts mobilisés dans la zone d'extraction



2.4.1.3 - FORCE DE FROTTEMENT SUR LES JOUES DE LA TREMIE

En désignant par α l'inclinaison du tapis, la contrainte verticale dans le matériau situé entre le plan de rupture et le tapis s'écrit (fig 2.11.b) :

$$\sigma_{VK} = \sigma_{V0}(\theta) + \frac{\rho g y}{2 \cos \alpha} \quad (2.56)$$

Comme ce matériau se trouve confiné la contrainte σ_{VK} est principale majeure. La contrainte horizontale σ_{HK} qui engendre le frottement sur les joues latérales est principale mineure et s'écrit :

$$\sigma_{HK} = \frac{\sigma_{VK}}{k} = \frac{1}{k} \left(\sigma_{V0}(\theta) + \frac{\rho g y}{2 \cos \alpha} \right) \quad (2.57)$$

k est le coefficient de buttée donné par la formule (2.18).

Si μ_K désigne le coefficient de frottement du matériau avec les joues, la force K qui s'exerce sur celles-ci s'écrit :

$$K = \int_{\Sigma_2} dK = \int_{\Sigma_2} 2 \sigma_{HK} \mu_K y \, dx'$$

Le calcul effectué à l'annexe A.3 donne

$$K = \rho g e^{2+m} l^{1-m} Z \quad (2.58)$$

L'expression de Z se trouve en annexe A.3, formule (a.24)

2.4.1.4 - REACTION DU TAPIS

La réaction R du tapis et son angle d'inclinaison φ_{te} par rapport à la perpendiculaire à celui-ci constituent les principales inconnues. φ_{te} représente le frottement réellement mobilisé (ou effectif) entre le matériau et le tapis.

2.4.2 - CONDITION DE NON-GLISSEMENT MATERIAU-TAPIS.

L'équation d'équilibre du matériau isolé entre le plan de rupture et le tapis (fig 2.11.a) projeté sur les axes x et z s'écrit :

$$\begin{cases} (K\cos\omega)\sin\alpha + W + F = R \cos(\varphi_{te} - \alpha) \\ (K\cos\omega)\cos\alpha + F\tan(\varphi_e - \lambda) = R \sin(\varphi_{te} - \alpha) \end{cases} \quad (2.59)$$

Les équations (2.59) engendrent :

$$\varphi_{te} = \text{Arctan} \left[\frac{Z\cos\alpha + H\tan(\varphi_e - \lambda)}{Z\sin\alpha + V + H} \right] + \alpha \quad (2.60)$$

$$R = \rho g e^{2+m} l^{1-m} \frac{Z\cos\alpha + H\tan(\varphi_e - \lambda)}{\sin(\varphi_{te} - \alpha)} \quad (2.61)$$

Si φ_t désigne l'angle de frottement matériau-tapis, φ_{te} doit être inférieur à φ_t sinon il se produit un glissement. Dans ce dernier cas le tapis patine et ne peut extraire du matériau. Il faut donc choisir les paramètres relatifs à la trémie et au dispositif de dosage de façon que le rapport φ_{te}/φ_t reste faible pour l'ensemble des matériaux à doser.

2.4.3 - PERFORMANCE DU DISPOSITIF DE DOSAGE

2.4.3.1 - PUISSANCE DEVELOPPEE PAR LE MOTEUR

L'effort de traction T exercée par le tapis vaut

$$T = R\sin\varphi_{te}$$

Si v_t désigne la vitesse du tapis, la puissance P développée par le moteur s'écrit :

$$P = T v_t$$

$$P = \rho g e^{2+m} l^{1-m} v_t \sin \varphi_{te} \frac{Z \cos \alpha + H \tan(\varphi_e - \lambda)}{\sin(\varphi_{te} - \alpha)} \quad (2.62)$$

2.4.3.2 - ENERGIE DEVELOPPEE PAR LE MOTEUR :

Pendant une durée Δt le moteur développe une énergie E_e telle que

$$E_e = P \cdot \Delta t \quad (2.63)$$

2.4.3.3 - PERFORMANCE DU DISPOSITIF DE DOSAGE

C'est l'énergie nécessaire pour déplacer le matériau de la surface d'extraction jusqu'à l'orifice de sortie pendant une durée t . En désignant par d la distance moyenne parcourue par le matériau et q le débit d'écoulement, cette énergie s'écrit :

$$E_i = (q \Delta t) \rho g d$$

En accord avec la partie 1.1.2.2.a le débit q peut s'écrire (fig. 2.11.b) :

$$q = \xi v_t l^{1-m} l_2^m e \quad (2.64)$$

dans laquelle ξ désigne un coefficient de proportionnalité caractéristique du dispositif de dosage. l_2 est définie sur la figure 2.11.b. La distance moyenne d parcourue par le matériau s'obtient par (fig 2.11.b) :

$$\begin{cases} d = \frac{1}{\omega L} \int_0^L \int_0^\omega \frac{L-x}{\cos \theta} dx d\theta \\ d = \frac{L}{2} \frac{1}{2\omega} \text{Log} \left[\frac{1+\sin \omega}{1-\sin \omega} \right] \end{cases} \quad (2.65)$$

L et ω sont définis sur les figures 2.11.a et b.
Lorsque $m = 0$ alors ω tend vers 0 et d tend vers $L/2$

L'expression de l'énergie utile devient :

$$E_i = \rho g e l^{1-m} l_2^m \xi v_t \Delta t \frac{L}{2} \frac{1}{2\omega} \text{Log} \left[\frac{1+\sin \omega}{1-\sin \omega} \right] \quad (2.66)$$

2.4.3.4 - ENERGIE SPECIFIQUE

L'efficacité du dispositif de dosage va être jugée à partir du rapport E_e / E_i . Une bonne performance correspond à une valeur faible de ce rapport c'est à dire inférieure ou égal à 1. Ce rapport s'appelle énergie spécifique notée E_s , et s'écrit :

$$\left\{ E_s = \left[e^{1+m} \sin \varphi_{te} \frac{Z \cos \alpha + \tan(\varphi_e - \lambda)}{\sin(\varphi_{te} - \alpha)} \right] \left[\xi 1_2 \frac{mL}{22\omega} \text{Log} \left(\frac{1 + \sin \omega}{1 - \sin \omega} \right) \right]^{-1} \right. \quad (2.67)$$

2.4.4 - ANALYSE DES RESULTATS

2.4.4.1 - CONSIDERATION DU FROTTEMENT MATERIAU-TAPIS

Les figures 2.12.a,...,d donnent des indications sur la conception du dispositif de dosage afin d'éviter le glissement matériau-tapis. Il faut pour cela que l'angle de frottement réellement mobilisé ou effectif entre le matériau et le tapis φ_{te} soit inférieur à l'angle de frottement matériau-tapis φ_t .

Généralement φ_t ne dépasse pas 25°. On constate sur les figures 2.12.a,b l'inconvénient d'une inclinaison de tapis (> 0°). En effet son accroissement augmente la valeur de φ_{te} surtout pour le cas d'une trémie bidimensionnelle (fig 2.12.b) ; d'autant plus que φ_{te} augmente avec la vitesse du tapis (fig 2.12.c) qui peut être grande lorsqu'on fonctionne à fort débit. Il faut éviter les ouvertures de trappe (=A) trop petites conformément à la figure 2.12.d. Les figures 2.12.a,b,c,d montrent qu'il faut aussi prendre en compte les caractéristiques de la trémie et du matériau lors du dimensionnement du dispositif de dosage. Il apparaît sur les figures b.2.a et b de l'annexe B que l'angle d'inclinaison de la paroi joue un rôle important. En effet plus la paroi est escarpée plus φ_{te} est élevée surtout à forte inclinaison du tapis (> 0°). L'angle de frottement effectif φ_{te} varie aussi avec l'angle de frottement à la paroi et l'angle de frottement interne effectif φ_e (Cf. fig b.2.c,d de l'annexe B) mais l'amplitude des variations est relativement faible si bien qu'on peut attacher moins d'importance à ces deux paramètres. En tout cas le cas défavorable s'obtient avec une trémie dont le contenu charge beaucoup le tapis.

2.4.4.2 - CONSIDERATION ENERGETIQUE

Selon la définition donnée au 2.4.3.4 une valeur de l'énergie spécifique E_s inférieure ou égale à 1 correspond à une bonne rentabilité. Contrairement au cas du frottement effectif matériau-tapis une inclinaison de tapis permet de gagner mais légèrement en énergie spécifique (fig 2.13.a,b). Par contre la figure 2.13.d confirme l'inconvénient des ouvertures de trappe trop faibles, d'autant plus qu'à vitesse de tapis élevée, on dépense beaucoup d'énergie (fig 2.13.c).

Les figures 2.13.a,...,d et les figures b.3.a,...,d de l'annexe B montrent, comme c'était le cas avec l'angle de frottement effectif matériau-tapis, qu'une trémie dont le contenu charge beaucoup le tapis entraîne une forte consommation en énergie. Tel est le cas avec une trémie à paroi escarpée et lisse (Cf. fig b.3.a,b et d de l'annexe B) ou avec un matériau de faible angle de frottement interne effectif (Cf. fig b.3.c de l'annexe B)

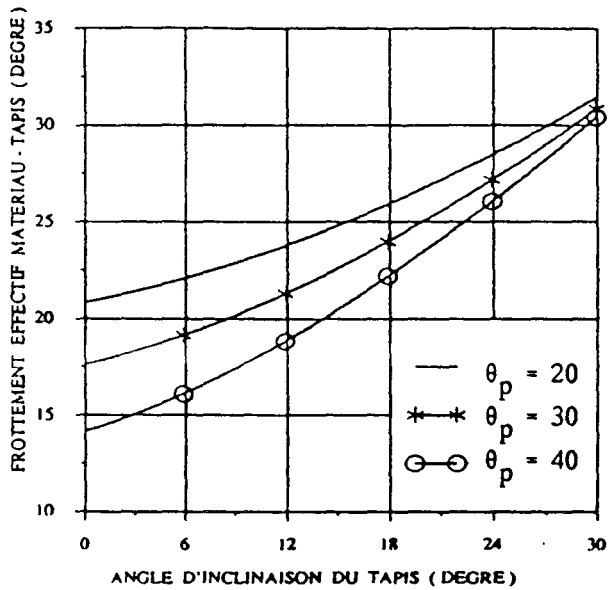
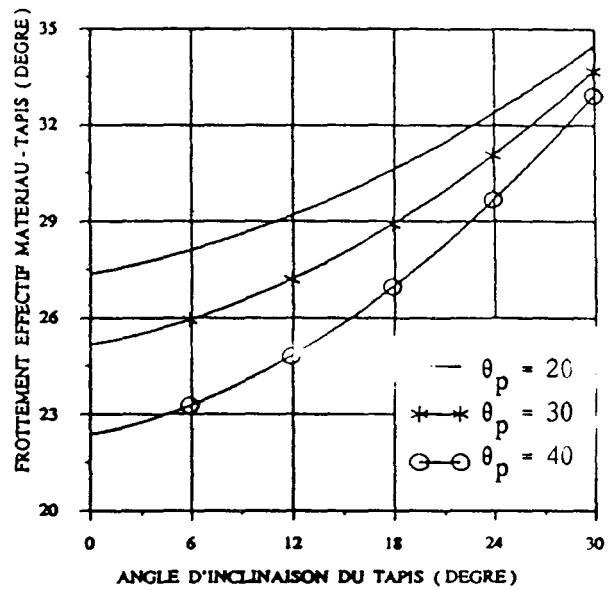
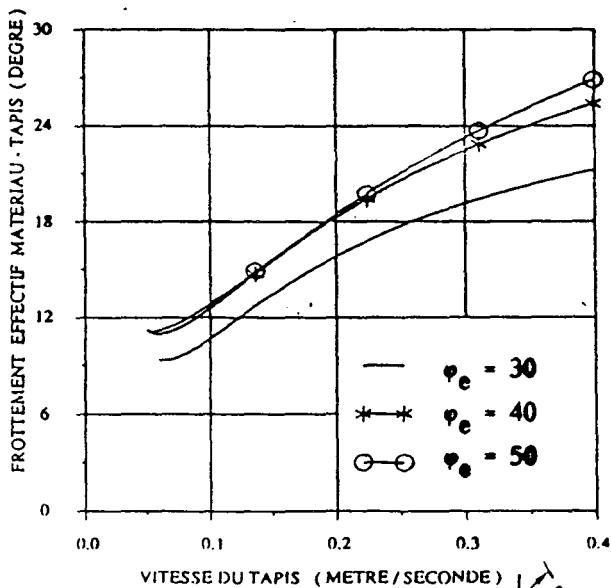
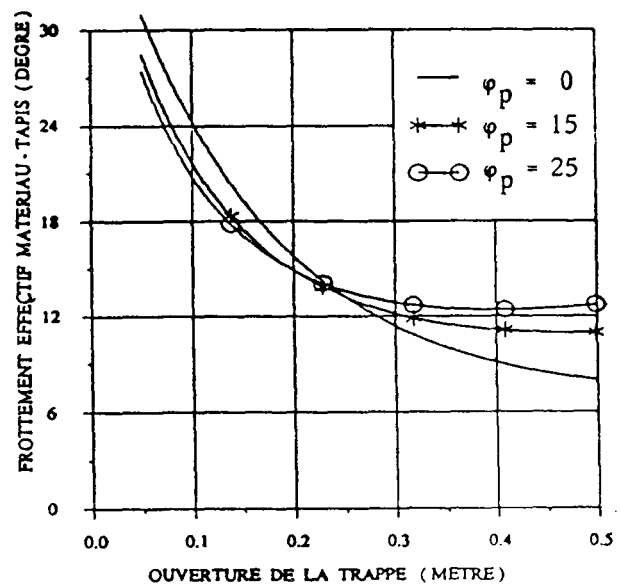
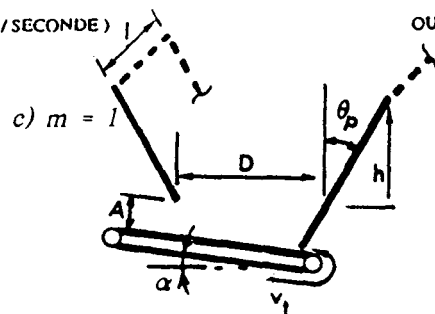
Figures 2.12 - Frottement effectif matériau-tapis

Les paramètres qui ne varient pas prennent les valeurs suivantes (sinon leurs valeurs sont indiquées sur les figures):

$$\begin{aligned} v_t &= 0.25 \text{ m/s} \\ h &= 2 \text{ m} \\ \theta_p &= 30^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A &= 0.25 \text{ m} = e \\ D &= 0.5 \text{ m} \\ \varphi_p &= 25^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha &= 10^\circ \\ \rho &= 1,5 \text{ t/m}^3 \\ \varphi_e &= 40^\circ \end{aligned}$$

a) $m = 1$ b) $m = 0 ; l = 0.5 \text{ m}$ c) $m = 1$ d) $m = 1$ 

Figures 2.13 - Energie spécifique

Les paramètres qui varient sont annotés sur les figures sinon ils prennent les valeurs suivantes :

$$v_t = 0.25 \text{ m/s}$$

$$h = 2 \text{ m}$$

$$\theta_p = 30^\circ$$

$$A = 0.25 \text{ m} = e$$

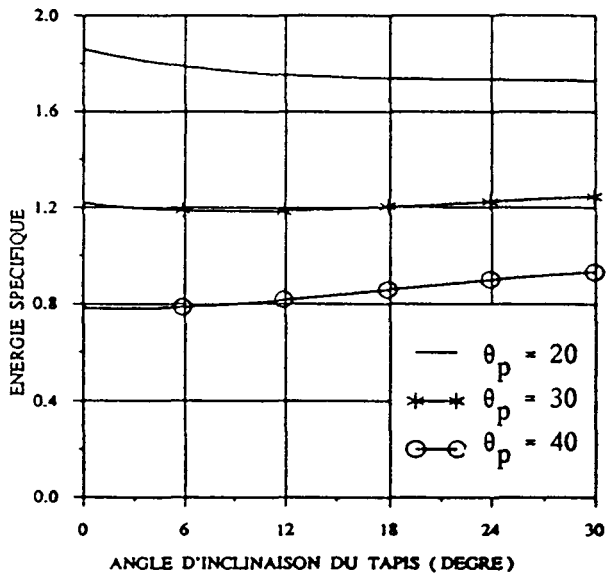
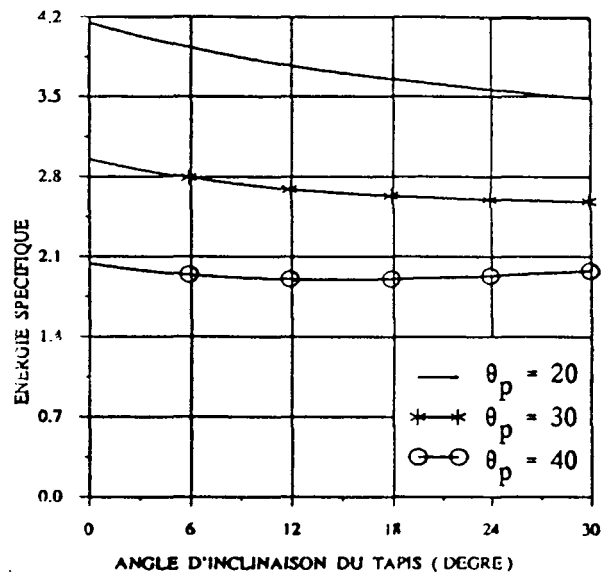
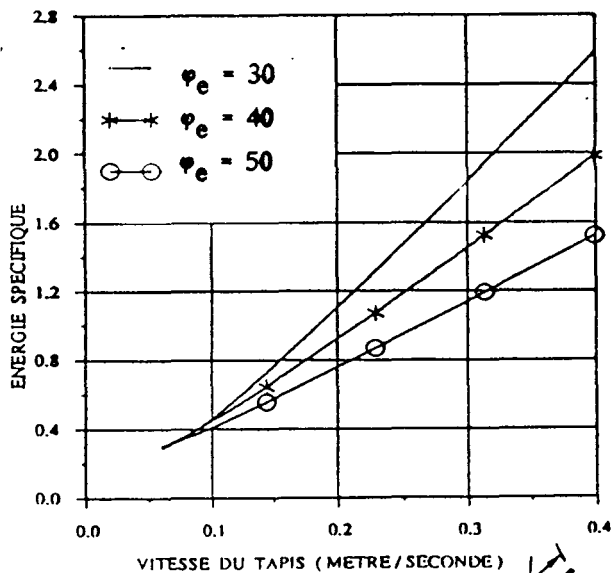
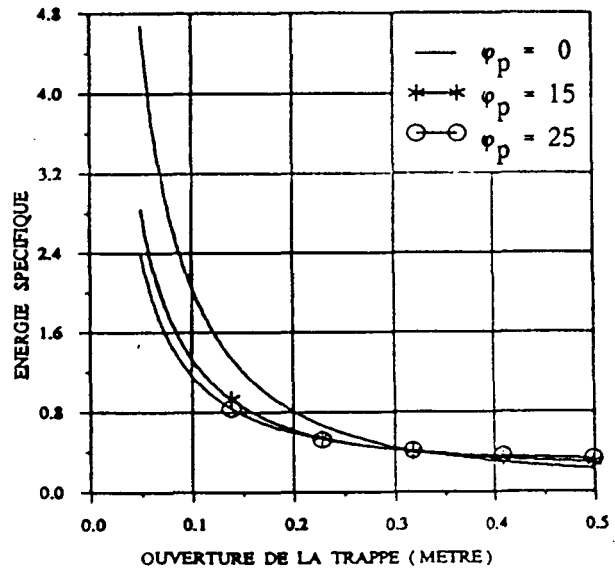
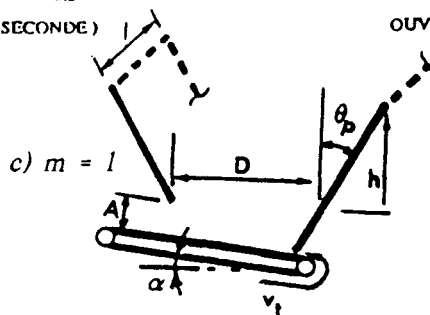
$$D = 0.5 \text{ m}$$

$$\varphi_p = 25^\circ$$

$$\alpha = 10^\circ$$

$$\rho = 1.5 \text{ t/m}^3$$

$$\varphi_e = 40^\circ$$

a) $m = 1$ b) $m = 0$; $l = 0.5 \text{ m}$ c) $m = 1$ d) $m = 1$ 

2.4.4.3 - SYNTHESE

On vient d'élaborer une méthode qui permet de dimensionner correctement un dispositif de dosage en fonction des caractéristiques du tapis doseur, de l'ouverture de la trappe, du matériau et de la trémie. L'écriture de la condition de non-glissement du matériau sur le tapis et la considération de la consommation en énergie donnent des renseignements utiles pour la conception.

D'une part, il faut éviter si possible les ouvertures de trappe trop faibles ainsi que les inclinaisons de tapis trop fortes.

D'autre part, les trémies à paroi lisse et escarpée doivent être équipées d'un moteur suffisamment puissant pour doser un matériau pesant et à écoulement facile.

CHAPITRE 3

DETERMINATION ET ANALYSE DES CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX



L'étude du dosage nécessite la connaissance des propriétés d'écoulement des matériaux. Les expérimentations décrites aux chapitres 4 et 5 impliquent cinq matériaux différents. Chacun de ces derniers possède plusieurs caractéristiques physico-géométriques mesurables dont certaines influent sur ses propriétés d'écoulement. Le but est de déterminer ces différentes caractéristiques et d'en faire une analyse pour dégager vis-à-vis de l'écoulement d'une part les paramètres les plus influents et d'autre part une classification des matériaux.

Ce chapitre constitue une étape pour atteindre cet objectif.

3.1 - MATERIAUX

3.1.1 - CHOIX DES MATERIAUX

Les matériaux concernés par nos expérimentations servent généralement aux tests d'aptitude des doseurs à granulats au banc d'essai de la station d'Essai des Matériels Routiers de Blois (cf. fig.4.1). Ils font déjà l'objet d'une classification vis-à-vis de leurs comportements au dosage [89] et se composent de :

- 1 matériau de type A sans fines : le sable roulé de Loire, de taille maximale 4 mm et de teneur en fines négligeable (noté sable roulé de Loire 0/4).
- 3 matériaux de type B avec fines :
 - * le sable broyé de Loire de taille maximale 2 mm et avec environ 20 % de fines (noté sable broyé de Loire 0/2).
 - * le sable broyé calcaire de Tripleville, de taille maximale 2 mm et avec environ 15 % de fines (noté sable broyé calcaire 0/2).
 - * le sable broyé calcaire de Tripleville, de taille maximale 6 mm et avec environ 10 % de fines (noté sable broyé calcaire 0/6)
- 1 matériau de type C à écoulement difficile :
 - * les cendres volantes de Vitry-sur-Seine humide.

Cette classification peut être illustrée à partir de la variation ΔP de la charge au tapis pendant le dosage. Pour les matériaux de type A (sans fines et non pollués) le dosage volumétrique suffit. En effet la valeur de ΔP reste généralement en deçà de la tolérance fixée par le C.C.T.G. (5 %). La classe de type B se compose de matériaux plus ou moins difficiles à doser suivant leurs teneurs en eau et leurs teneurs en fines. Généralement la valeur de ΔP se trouve hors tolérance en dosage volumétrique pour ces matériaux. Leur dosage nécessite l'utilisation de vibreur et le fonctionnement en pondéral. Les matériaux de type C, très colmatants, posent davantage de problèmes que ceux de type B. Ils peuvent former une voûte stable malgré la présence de vibreur pour certaines trémies. Ils développent aussi une variation importante de la teneur en eau qui par conséquent devrait être prise en compte par le dosage pondéral.

3.1.2 - CHOIX DES TENEURS EN EAU

La variation de la charge ΔP comprend une composante ΔP_1 due à la variation de la teneur en eau et une composante ΔP_2 due à la variation de la hauteur de matériau dans la trémie [89]. La valeur de ΔP_1 peut s'évaluer en effectuant une série d'essais à différentes valeurs de la teneur en eau w du matériau et en calculant le poids au mètre de matériau sec P (sur la bande transporteuse (Cf. fig 4.1)). Généralement lorsque w augmente P décroît jusqu'à un minimum noté $w_{\max}$ puis augmente. La figure 3.1 établie avec le sable broyé calcaire 0/2 illustre ce phénomène. Pour les matériaux à écoulement facile P ne varie pratiquement pas donc la recherche de $w_{\max}$ peut ne pas être évidente. En tout cas le minimum $w_{\max}$ correspond à l'état du matériau à partir duquel il commence à y avoir de l'eau libre. La teneur en eau du granulat de chantier dépasse rarement $w_{\max}$. Ainsi ce dernier correspond à l'état du matériau qui développe la plus grande valeur de ΔP_1 donc au dosage le plus difficile. Le tableau 3.1 montre les valeurs approximatives de $w_{\max}$ pour les 5 matériaux utilisés dans nos essais. Le granulat de chantier est rarement sec, il possède au minimum une teneur en eau $w_{\min}$. Les essais décrits au chapitre 4 étant réalisés dans les conditions réelles de chantier, nous choisissons pour chaque matériau les deux teneurs en eau $w_{\min}$ (celle du matériau pris dans le tas) et $w_{\max}$ (obtenue après mouillage).

Le tableau 3.1 montre les plages de variation de la teneur en eau (plus grande étendue [$w_{\min}$, $w_{\max}$]) des cinq matériaux utilisés pour les essais en trémies réelles (Chapitre 4).

Figure 3.1 - Courbe de mouillage du sable calcaire 0/2 de Tripleville avec la trémie à extraction testée (Chap 4) - Débit 120 t/h

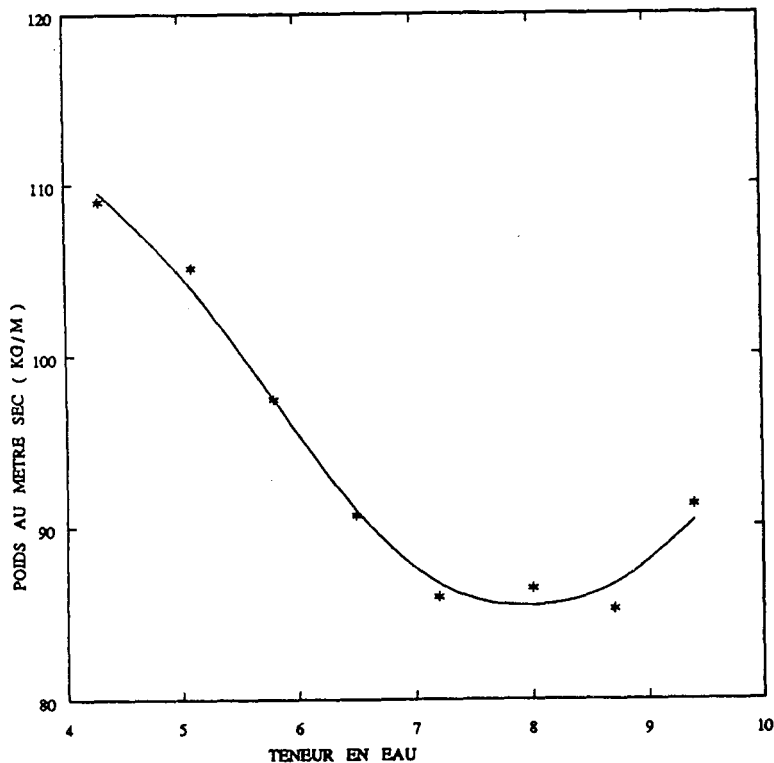


Tableau 3.1. : Valeurs approximatives de la teneur en eau w_{max} pour les matériaux utilisés.

MATERIAUX	Variation de la teneur en eau
sable roulé de Loire 0/4	2 à 8 %
sable broyé de Loire 0/2	3.5 à 10 %
sable broyé calcaire 0/2	3.5 à 10 %
sable broyé calcaire 0/6	3 à 8 %
cendres volantes de Vitry-sur-Seine	10 à 25 %

3.2 - ESSAIS DE CARACTERISATION DES MATERIAUX

Les observations faites à partir des tests d'aptitude des doseurs à granulats effectués au banc d'essai de Blois permettent de sélectionner les paramètres susceptibles d'intervenir dans l'écoulement. Les essais ont été effectués en collaboration avec le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Toulouse avec les deux sables de Loire et les deux sables calcaires mentionnés plus haut. Les cendres volantes ne figurent pas parmi les matériaux à tester en raison des contraintes de temps et d'approvisionnement. Les essais se déroulent suivant des modes opératoires bien définis dont certains sont indiqués en référence.

3.2.1 - DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES PHYSICO-GEOMETRIQUES DES MATERIAUX

- Analyse granulométrique (NF P 18-560) :

La granulométrie s'intéresse à la grosseur des grains qui intervient dans l'écoulement tant sur le frottement que sur la cohésion intergranulaire lorsque ceux-ci se mobilisent. Il n'existe pas de paramètre qui, seul, quantifie les informations contenues dans une courbe granulométrique. Pour représenter cette dernière nous retenons deux paramètres ; la taille maximale des grains et la teneur en fines (taille < 80 μ).

- Essai à l'angulomètre (NF P 18-564) :

L'état de surface ou microrugosité conditionne le frottement interne. L'angularité favorise la stabilité du matériau en augmentant ce dernier. La forme des grains influe sur leur arrangement donc également sur le frottement interne. L'essai à l'angulomètre constitue une mesure globale des effets de ces trois paramètres. Il s'agit de mesurer le temps d'écoulement d'une quantité de matériau à travers un orifice calibré.

- Mesure du coefficient de friabilité (NF P 18-576) :

La granulométrie d'un matériau friable peut évoluer au cours des transports et manutentions par fragmentation. Ainsi son comportement vis-à-vis de l'écoulement peut changer . L'essai consiste à mesurer l'évolution granulométrique du matériau produite dans un cylindre en rotation dans des conditions bien définies. Le coefficient de friabilité est le rapport exprimé en pourcentage entre la masse des éléments fins inférieurs à 0.05 mm produits au cours de l'essai et la masse de matériau soumis à cet essai.

- Essai d'équivalent de sable à 10 % de fines (NF P 18-597) :

Un sable propre s'écoule mieux qu'un sable pollué. L'essai permet d'évaluer la qualité des éléments fins par sédimentation dans une éprouvette calibrée. Cette qualité s'exprime par le rapport en pourcentage entre la hauteur des éléments "sableux" qui sédimentent et la hauteur totale de l'ensemble "sédiment + flocculat".

- Essai au bleu de méthylène (NF P 18-596) :

Le bleu de méthylène étant adsorbé préférentiellement par les argiles, les matières organiques et les hydroxydes de fer, l'essai rend compte de la propreté superficielle des éléments fins. Il constitue une alternative de l'essai d'équivalent de sable à 10 % de fines. La valeur de bleu des fines s'exprime par le rapport entre la quantité de bleu de méthylène adsorbée et la quantité de fines soumises à l'essai (= 100g).

- Mesure de la surface spécifique Blaine (NF P 15-442)

Les éléments fins jouent des rôles importants dans l'écoulement des matériaux. La surface spécifique mesurée au perméabilimètre de BLAINE rend compte de la finesse de ces éléments. Elle se calcule en fonction du temps que met un volume d'air constant, sous une pression et une température données, à traverser une couche de fines tassées suivant un procédé défini.

- Mesure des masses volumiques (NF P 18- (554,555 et 558))

Pour un écoulement gravitaire le poids constitue l'élément moteur d'où l'importance du paramètre masse volumique. Le quotient de la masse sèche d'un échantillon par le volume de sa matière y compris les vides contenus dans les grains représente la masse volumique réelle. Lorsque le volume de ces vides est exclu, il s'agit de la masse volumique absolue.

- Essai Proctor modifié

Un matériau fortement consolidé ne peut pas s'écouler dans une trémie. Ce problème arrive parfois dans les silos de grandes dimensions à cause de la charge importante. Il peut aussi se produire lorsque la hauteur de remplissage est trop grande à cause de l'énergie d'impact. D'où l'intérêt de l'essai Proctor qui permet, pour une énergie donnée, d'estimer l'évolution en compacité du matériau en fonction de sa teneur en eau.

- Essai de poinçonnement

Immédiatement après l'essai Proctor on effectue un essai de poinçonnement pour déterminer l'indice portant du matériau. Ce dernier peut informer sur la résistance d'un obstacle tel qu'une voûte vis-à-vis de la charge exercée par le matériau situé au-dessus. L'indice portant exprime le rapport en pourcentage entre la pression exercée sur le matériau et celle exercée sur un matériau standard pour obtenir le même enfoncement.

- Détermination de l'indice de vide de RIGDEN (NF P 18-565)

L'indice de vide du matériau renseigne indirectement sur son état de consolidation auquel dépend l'écoulement. L'indice de vide de RIGDEN exprime en pourcentage le quotient du volume des vides granulaires existant entre les fines sèches compactées par le volume du conteneur occupé par les fines.

Les résultats des différents essais décrits ci-dessus figurent dans le tableau 3.2. Certains essais nécessitant des fines manquent pour le sable roulé de Loire qui n'en contient pratiquement pas.

- Essai à la presse de compactage à cisaillement giratoire (P.C.G).

La P.C.G sert généralement aux études de la formulation des mélanges granulaires et de leurs comportements au compactage. Pour le problème d'écoulement il donne une idée sur l'aptitude au compactage du matériau et donc sur la tendance à développer une cohésion. L'essai consiste à mettre en rotation à vitesse constante une éprouvette contenant le matériau. L'axe de l'éprouvette décrit un cône dont le sommet se confond avec l'extrémité inférieure de celle-ci. Le demi-angle au sommet est fixé pendant l'essai. Le matériau subit des effets simultanés d'une faible compression. Ces effets simulent le compactage. Des études antérieures ont permis d'établir une relation empirique entre la compacité C et le nombre de girations N :

$$C = \frac{A\sqrt{N}+B}{\sqrt{N}+D} \quad (3.1)$$

La valeur de C exprime en pourcentage le rapport entre la masse volumique vrac du matériau compacté et sa masse volumique réelle. A, B et D désignent des constantes expérimentales caractéristiques du matériau.

Le tableau 3.3 résume les résultats d'essai. Le sable roulé de Loire donnait des résultats inexploitable. Il s'apprête mal aux essais à la P.C.G. donc au compactage. Les compacités Co et CINF correspondent respectivement à la valeur de N voisin de zéro et à N très grand. COPM et NOPM désignent respectivement la compacité et le nombre de girations correspondant à l'optimum PROCTOR.

Tableau 3.2 : Caractéristiques physico-géométriques des matériaux

CARACTERISTIQUES	MATERIAUX			
	Sable roulé de Loire 0/4	Sable broyé de Loire 0/2	Sable broyé calcaire Tripleville 0/2	Sable broyé calcaire Tripleville 0/6
Dimension maximale	4	2	2	6
Passant à 50 μ (%)	0.1	9.5	9	4
Coefficient d'écoulement	14	32	46	20
Coefficient de friabilité	10.7	18.8	36.5	43.6
Equivalent de sable à 10 % de fines	100	62	45.1	37.9
Valeurs de bleu des fines	-	0.7	1.2	1.5
Surface spécifique Blaine (cm^2/g)	-	2185	3189	2350
Masse volumique réelle (g/cm^3)	2.606	2.605	2.55	2.54
Masse volumique réelle des fines (g/cm^3)	-	2.63	2.60	2.61
Masse volumique absolue	2.62	2.63	2.67	2.66
Masse volumique absolue des fines (g/cm^3)	-	2.64	2.64	2.64
Densité O.P.M	1.68	2	2.03	2.04
Teneur en eau O.P.M (%)	8	8	9	7.1
Indice Portant immédiat	4.5	89	74	84
Teneur en eau I.P.I	8	7.3	8.8	6.5
Indice de vide de Rigden	31.3	25.75	31.1	32.26
Indice de vide de Rigden sur les fines	-	38.04	38.47	39.26

Tableau 3.3 : Essais à la P.C.G.

TENEUR EN EAU	PARA - METRES	MATERIAUX		
		Sable broyé de Loire	Sable broyé calcaire	Sable broyé calcaire
		0/2	0/2	0/6
0	A	80.1047	76.7087	74.2201
	B	196.4282	177.1994	210.3648
	D	3.0986	2.7104	3.3089
	CINF	80.1	76.7	74.2
	Co	63.4	65.4	63.6
	COPM	76.8	79.6	80.5
	NOPM	155	HORS LIMITE	HORS LIMITE *
4	A	78.8403	73.7204	76.0702
	B	166.1627	92.5621	366.2230
	D	2.6796	1.5887	5.4629
	CINF	78.8	73.7	76.1
	Co	62.0	58.3	67.0
	COPM	76.8	79.6	80.5
	NOPM	367	HORS LIMITE	HORS LIMITE
9	A	83.6838	86.0612	84.2976
	B	142.6730	329.1298	134.0496
	D	2.4717	5.1495	22.3150
	CINF	83.6	86.1	84.3
	Co	57.7	63.9	57.9
	COPM	76.8	79.6	80.5
	NOPM	46 *	157	187

* : départ de la mesure à 40 girations

3.2.2 - DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES DE CISAILLEMENT DES MATERIAUX

La partie 1.2.2.1. de la bibliographie montre la liaison étroite entre les caractéristiques de cisaillement et les propriétés d'écoulement d'un matériau de COULOMB. En effet ces dernières s'obtiennent à partir d'essais de cisaillement réalisés dans les conditions de sollicitations réelles dans une trémie. Les contraintes dans une trémie de dosage étant généralement faible (inférieures à 15 kPa) il faut utiliser des appareils de cisaillement spéciaux tels que le "flow-factor tester" de JENIKE ou les appareils de cisaillement annulaire suivant des modes opératoires bien définis. Ne disposant pas de ces matériels nous avons utilisé les appareils classiques de la mécanique de sol. Les caractéristiques de cisaillement obtenus ne représentent donc pas celles réellement mobilisées pendant l'écoulement. Les essais serviront seulement à comparer un matériau à écoulement facile (sable roulé de Loire 0/4) et un matériau difficile (sable broyé de Loire 0/2) puis à voir l'influence de la granulométrie, la teneur en eau et la masse volumique apparente. En effet ces trois derniers paramètres semblent exercer des rôles prépondérants pendant le dosage. Avec des efforts normaux de 10, 25 et 50 kPa les essais à la boîte de CASAGRANDE ne donnent pas entière satisfaction quant à la régularité des mesures ainsi les essais triaxiaux CD sont finalement retenus. Les caractéristiques de quelques essais avec les courbes de déformation figurent dans l'annexe C.1. Le tableau 3.4 contient les principaux résultats.

Tableau 3.4. Résultats des essais triaxiaux CD avec le sable roulé de Loire 0/4 et le sable broyé de Loire 0/2

MATERIAUX	γ_d (kN/m ³)	w (%)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Sable roulé de Loire 0/4	14	0	0	42
		3	6	32
		6	8	32
		9	8	33
	15	0	0	46
		3	0	42
		6	12	35
		9	14	31.5
	16	0	0	44
		3	0	40
		6	0	40
		9	0	40
Sable broyé de Loire 0/2	14	0	0	49
		4	6	30
		9	6	28
	15	0	0	44
		4	0	35
		6.5	0	35
		9	5.7	29
	16	0	0	43
		4	6	32
		6.5	11	30
		9	11	30

3.3 - ANALYSE DES RESULTATS

3.3.1 - TECHNIQUE DE L'ANALYSE FACTORIELLE EN COMPOSANTE PRINCIPALE ET STRUCTURATION DES DONNEES

Le comportement à l'écoulement d'un matériau peut varier en fonction des différentes caractéristiques déterminées ci-dessus. Pour voir plus précisément comment se fait cette variation et observer les différences entre les matériaux testés, on utilise l'analyse factorielle en composante principale, une méthode statistique multi-dimensionnelle dont le principe est brièvement rappelé à l'annexe C.2. Les tableaux 3.5 à 3.8 présentés ci-dessous, feront l'objet de l'analyse. Les tableaux 3.5 et 3.6 sont extraits du même tableau 3.2 mais 3.5 s'intéresse aux 4 matériaux testés tandis que 3.6 s'intéresse uniquement aux sables broyés (donc sans le sable roulé de Loire). Ces deux tableaux comportent en colonne les caractéristiques physico-géométriques mesurées (variables) et en ligne les matériaux (individus). Le tableau 3.7 est extrait du tableau 3.3 des essais PCG avec en colonne les 3 matériaux broyés et en ligne les compacités mesurées à différentes valeurs de la giration et de la teneur en eau. Enfin le tableau 3.8 représente intégralement le tableau 3.4 : les paramètres mesurés figurent en colonne et les essais effectués en ligne.

IDENTIFICATEURS DES VARIABLES

ANGU	temps d'écoulement à l'angulometre	MVA	masse volumique absolue sur toute la granulometrie
BLEU	valeur de bleu des fines	MVAF	masse volumique absolue des fines
COHE	cohesion apparente	MVR	masse volumique réelle toute la granulometrie
COPM	Compacite à l'OPM	MVRF	masse volumique réelle des fines
DENS	poids volumique vrac	RIGD	indice de vide Rigden sur toute la granulometrie
DMAX	dimension maximale des grains	RIGF	indice de vide Rigden des fines
DOPM	densite optimale Proctor	SSB	surface spécifique Blaine
EAU	teneur en eau	WIPI	teneur en eau pour l'IPI
ES10	equivalent sable	WOPM	teneur en eau optimale Proctor
FINE	teneur en fines		
FRIA	friabilite		
FROT	angle de frottement interne		
IPI	indice portant immediat		

IDENTIFICATEURS DES INDIVIDUS

CNF0 compacité pour N infini , w = 0	CZR9 compacité pour N = 0 , w = 9
CNF4 compacité pour N infini , w = 4	SBL2 sable broyé de Loire 0/2
CNF9 compacité pour N infini , w = 9	SCL2 sable broyé calcaire 0/2
COPM compacité à l'OPM	SCL6 sable broyé calcaire 0/6
CZRO compacité pour N = 0 , w = 0	SRO4 sable roulé de Loire 0/4
CZR4 compacité pour N = 0 , w = 4	
ESR <i>i i = 1,...,9)</i> essai no <i>i</i> avec	ESB <i>i i = 1,...,9)</i> essai no <i>i</i> avec
<i>)</i> le sable roule	<i>)</i> le sable broyé
SRI <i>i = 10,11,12)</i> de Loire 0/4	SB <i>i i = 10,12)</i> de Loire 0/2

Tableau 3.5 - Caractéristiques physico-géométriques des matériaux testés

!	!	DMAX	!	ANGU	!	ES10	!	FINE	!	DOPM	!	WOPM	!	IPI	!	WIPI	!	RIGD	!	MVR	!	MVA	!	FRIA	!	COPM	!	
!	SRO4	!	4.00	!	14.00	!	100.00	!	0.00	!	1.68	!	8.00	!	4.50	!	8.00	!	31.30	!	2.61	!	2.62	!	10.74	!	64.47	!
!	SBR2	!	2.00	!	32.00	!	62.00	!	20.00	!	2.00	!	8.00	!	89.00	!	7.30	!	25.75	!	2.61	!	2.63	!	18.76	!	76.77	!
!	SCA2	!	2.00	!	46.00	!	45.10	!	15.00	!	2.03	!	9.00	!	74.00	!	8.80	!	31.10	!	2.55	!	2.67	!	36.54	!	79.60	!
!	SCA6	!	6.00	!	20.00	!	37.90	!	10.00	!	2.04	!	7.10	!	84.00	!	6.50	!	32.26	!	2.54	!	2.66	!	53.58	!	80.47	!

tableau 3.6 - caractéristiques physico-géométriques des matériaux avec fines

!	!	DMAX	!	ANGU	!	ES10	!	FINE	!	BLEU	!	SSB	!	DOPM	!	WOPM	!	IPI	!	WIPI	!	RIGD	!	RIGF	!	MVR	!	
!	SBR2	!	2.00	!	32.00	!	62.00	!	20.00	!	0.70	!	2185	!	2.00	!	8.00	!	89.00	!	7.30	!	25.75	!	38.04	!	2.605	!
!	SCA2	!	2.00	!	46.00	!	45.10	!	15.00	!	1.20	!	3139	!	2.03	!	9.00	!	74.00	!	8.80	!	31.10	!	38.47	!	2.550	!
!	SCA6	!	6.00	!	20.00	!	37.90	!	10.00	!	1.50	!	2350	!	2.04	!	7.10	!	84.00	!	6.50	!	32.26	!	39.26	!	2.535	!
!		!		!		!		!		!		!		!		!		!		!		!		!		!		
!		!	MVRF	!	MVA	!	MVAF	!	FRIA	!	COPM	!																
!	SBR2	!	2.63	!	2.63	!	2.643	!	18.76	!	76.77	!																
!	SCA2	!	2.60	!	2.67	!	2.640	!	36.54	!	79.60	!																
!	SCA6	!	2.61	!	2.66	!	2.643	!	53.58	!	80.47	!																

tableau 3.7 - Comportement au compactage des matériaux avec fines

	SBR2	SCA2	SCA6
CNF0	80.1	76.7	74.2
CZR0	63.4	65.4	63.6
CNF4	78.8	73.7	76.1
CZR4	62.0	58.3	67.0
COPM	76.8	79.6	80.5
CNF9	83.6	86.1	84.3
CZR9	57.7	63.9	57.9

tableau 3.8 - Résistance au cisaillement des sables de Loire

!	!	DENS	!	EAU	!	COHE	!	FROT	!	
!	ESR1	!	14	!	0	!	0	!	42	!
!	ESR2	!	14	!	3	!	6	!	32	!
!	ESR3	!	14	!	6	!	8	!	32	!
!	ESR4	!	14	!	9	!	8	!	33	!
!	ESR5	!	15	!	0	!	0	!	46	!
!	ESR6	!	15	!	3	!	0	!	42	!
!	ESR7	!	15	!	6	!	12	!	35	!
!	ESR8	!	15	!	9	!	14	!	31.5	!
!	ESR9	!	16	!	0	!	0	!	44	!
!	SR10	!	16	!	3	!	0	!	40	!
!	SR11	!	16	!	6	!	0	!	40	!
!	SR12	!	16	!	9	!	0	!	40	!
!	ESB1	!	14	!	0	!	0	!	49	!
!	ESB2	!	14	!	4	!	6	!	30	!
!	ESB3	!	14	!	9	!	6	!	28	!
!	ESB4	!	15	!	0	!	0	!	44	!
!	ESB5	!	15	!	4	!	0	!	35	!
!	ESB6	!	15	!	6.5	!	0	!	35	!
!	ESB7	!	15	!	9	!	5.7	!	29	!
!	ESB8	!	16	!	0	!	0	!	43	!
!	ESB9	!	16	!	4	!	6	!	32	!
!	SB10	!	16	!	6.5	!	11	!	30	!
!	SB11	!	16	!	9	!	11	!	30	!

3.3.2 - INTERPRETATION DES RESULTATS

3.3.2.1 - CARACTERISTIQUES PHYSICO-GEOMETRIQUES DE TOUS LES MATERIAUX

L'interprétation porte sur les résultats du traitement du tableau 3.5.

TABLEAU 3.9 - STATISTIQUES SOMMAIRES DES VARIABLES CONTINUES

EFFECTIF TOTAL : 4
POIDS TOTAL : 4.00

NUM	IDEN - LIBELLE	EFFECTIF	POIDS	MOYENNE	ECART-TYPE	MINIMUM	MAXIMUM
1	DMAX - dimension maximale	4	4.00	3.50	1.66	2.00	6.00
2	ANGU - écoulement angulomet	4	4.00	28.00	12.25	14.00	46.00
3	ES10 - equivalent sable	4	4.00	61.25	24.02	37.90	100.00
4	FINE - teneur en fine	4	4.00	11.25	7.40	0.00	20.00
5	DOPM - densité OPM	4	4.00	1.94	0.15	1.68	2.04
6	WOPM - teneur en eau OPM	4	4.00	8.02	0.67	7.10	9.00
7	IPI - indice portant immed	4	4.00	62.88	34.13	4.50	89.00
8	WIPI - teneur en eau a l'IP	4	4.00	7.65	0.85	6.50	8.80
9	RIGD - indice de vide Rigde	4	4.00	30.10	2.55	25.75	32.26
10	MVR - masse volumique reel	4	4.00	2.58	0.03	2.54	2.61
11	MVA - masse volumique abso	4	4.00	2.64	0.02	2.62	2.67
12	FRIA - friabilite	4	4.00	29.91	16.55	10.74	53.58
13	COPM - compacite OPM	4	4.00	75.33	6.42	64.47	80.47

TABLEAU 3.10 - MATRICE DES CORRELATIONS

	DMAX	ANGU	ES10	FINE	DOPM	WOPM	IPI	WIPI	RIGD	MVR	MVA	FRIA	COPM
DMAX	1.00												
ANGU	-0.74	1.00											
ES10	-0.10	-0.55	1.00										
FINE	-0.56	0.75	-0.65	1.00									
DOPM	-0.11	0.64	-0.96	0.83	1.00								
WOPM	-0.84	0.77	0.08	0.25	0.00	1.00							
IPI	-0.14	0.57	-0.89	0.89	0.97	-0.09	1.00						
WIPI	-0.69	0.57	0.26	-0.05	-0.24	0.96	-0.35	1.00					
RIGD	0.65	-0.27	-0.10	-0.67	-0.18	-0.14	-0.36	0.07	1.00				
MVR	-0.39	-0.32	0.83	-0.14	-0.65	0.07	-0.48	0.10	-0.63	1.00			
MVA	0.07	0.61	-0.88	0.37	0.76	0.21	0.59	0.11	0.44	-0.95	1.00		
FRIA	0.51	0.19	-0.89	0.23	0.74	-0.33	0.62	-0.40	0.49	-0.95	0.86	1.00	
COPM	-0.03	0.62	-0.99	0.76	0.99	-0.02	0.94	-0.24	-0.06	-0.73	0.82	0.81	1.00

Le tableau 3.10 montre de bonnes corrélations dans deux groupes de variables :

- le premier groupe comporte DOPM, COPM et IPI, trois paramètres qui caractérisent l'aptitude au compactage du matériau et qui entretiennent d'assez bonnes corrélations avec MVA. En effet la compacité dépend de la masse volumique des grains. Les paramètres ES10 et MVR appartiennent aussi à ce groupe mais ils varient dans le sens opposé. En effet un matériau propre contient généralement très peu de fines donc se prête moins bien au compactage.

- Le second groupe comporte les teneurs en eau WOPM et WIPI qui entretiennent d'assez bonnes corrélations avec la taille maximale des grains DMAX. Ce dernier varie dans le sens opposé et a une liaison avec l'indice de vide RIGD. Cela signifie que plus le matériau est grossier plus il contient de vides et moins il peut retenir de l'eau.

Il existe une assez bonne corrélation entre ANGU et FINE qui, eux-mêmes, sont assez bien corrélés avec les deux groupes signalés ci-dessus. La teneur en fines influe donc sur le temps d'écoulement à l'angulomètre, sur l'aptitude au compactage et sur l'indice de vide du squelette granulaire.

EDITION DES VALEURS PROPRES

```

-----
APERCU DE LA PRECISION DES CALCULS :      TRACE AVANT DIAGONALISATION ... 13.0000
-----
SOMME DES VALEURS PROPRES ..... 13.0000
-----

```

TABLEAU 3.11 - HISTOGRAMME DES 13 PREMIERES VALEURS PROPRES

NUMERO	VALEUR VAPRE	POURCENT	POURCENT CUMULE	
1	6.7889	52.22	52.22	*****
2	3.9334	30.26	82.48	*****
3	2.2778	17.52	100.00	*****
4	0.0000	0.00	100.00	*
5	0.0000	0.00	100.00	*
6	0.0000	0.00	100.00	*
7	0.0000	0.00	100.00	*
8	0.0000	0.00	100.00	*
9	0.0000	0.00	100.00	*
10	0.0000	0.00	100.00	*
11	0.0000	0.00	100.00	*
12	0.0000	0.00	100.00	*
13	0.0000	0.00	100.00	*

TABLEAU 3.12 - INTERVALLES LAPLACIENS D'ANDERSON AU SEUIL 0.95

NUMERO	BORNE INFERIEURE	VALEUR PROPRE	BORNE SUPERIEURE
1	1.3702	6.7889	33.6367
2	0.7939	3.9334	19.4886
3	0.4597	2.2778	11.2856
4	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	0.0000

ETENDUE ET POSITION RELATIVE DES INTERVALLES

Les 3 premiers axes factoriels expliquent la totalité de l'inertie du nuage. Les intervalles Laplaceiens d'Anderson signifient que plus ces intervalles se recouvrent, moins bien la hiérarchie entre deux individus est contrôlée.

TABLEAU 3.13 - COORDONNEES DES VARIABLES SUR LES AXES 1 A 4

VARIABLES	COORDONNEES					CORRELATIONS VARIABLE-FACTEUR					ANCIENS AXES UNITAIRES				
IDEN - LIBELLE COURT	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0
VARIABLES ACTIVES															
DMAX - dimension maximale	0.02	1.00	0.00	0.00	0.00	0.02	1.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.50	0.00	-0.03	0.00
ANGU - ecoulement angulomet	-0.64	-0.73	-0.25	0.00	0.00	-0.64	-0.73	-0.25	0.00	0.00	-0.25	-0.37	-0.16	0.06	0.00
ES10 - equivalent sable	0.99	-0.12	-0.01	0.00	0.00	0.99	-0.12	-0.01	0.00	0.00	0.38	-0.06	-0.01	-0.21	0.00
FINE - teneur en fine	-0.71	-0.54	0.44	0.00	0.00	-0.71	-0.54	0.44	0.00	0.00	-0.27	-0.27	0.29	0.08	0.00
DOPM - densite OPM	-0.98	-0.08	0.19	0.00	0.00	-0.98	-0.08	0.19	0.00	0.00	-0.38	-0.04	0.13	0.22	0.00
WOPM - teneur en eau OPM	-0.03	0.84	-0.54	0.00	0.00	-0.03	0.84	-0.54	0.00	0.00	-0.01	-0.42	-0.36	0.01	0.00
IPI - indice portant immed	-0.91	-0.12	0.41	0.00	0.00	-0.91	-0.12	0.41	0.00	0.00	-0.35	-0.06	0.27	0.15	0.00
WIPI - teneur en eau a l'IP	0.17	-0.70	-0.70	0.00	0.00	0.17	-0.70	-0.70	0.00	0.00	0.07	-0.35	-0.46	-0.02	0.00
RIGD - indice de vide Rigde	-0.03	0.65	-0.76	0.00	0.00	-0.03	0.65	-0.76	0.00	0.00	-0.01	0.33	-0.50	-0.05	0.00
MVR - masse volumique reel	0.79	-0.41	0.46	0.00	0.00	0.79	-0.41	0.46	0.00	0.00	0.30	-0.21	0.30	-0.07	0.00
MVA - masse volumique abso	-0.88	0.09	-0.47	0.00	0.00	-0.88	0.09	-0.47	0.00	0.00	-0.34	0.05	-0.31	0.02	0.00
FRIA - friabilite	-0.83	0.53	-0.17	0.00	0.00	-0.83	0.53	-0.17	0.00	0.00	-0.32	0.27	-0.11	0.21	0.00
COPM - compacite OPM	-0.99	0.00	0.11	0.00	0.00	-0.99	0.00	0.11	0.00	0.00	-0.38	0.00	0.07	-0.91	0.00

Le tableau 3.13 permet de nommer les 3 axes factoriels. Le premier axe bénéficie le plus des contributions des variables suivantes :

- ES10 et MVR dans sa partie positive,
- COPM, DOPM, IPI, et MVA dans sa partie négative.

Cet axe est lié à la propreté et au comportement vis-à-vis du compactage. Il représente le premier groupe signalé dans l'analyse de la matrice des corrélations.

Le second axe bénéficie le plus des contributions des paramètres suivants :

- WOPM, ANGU, WIPI dans sa partie négative
- DMAX et RIGD dans sa partie positive.

Cet axe est lié au squelette granulaire et à la phase interstitielle (eau+air+ fines). Il représente le groupe 2 signalé dans l'analyse de la matrice des corrélations.

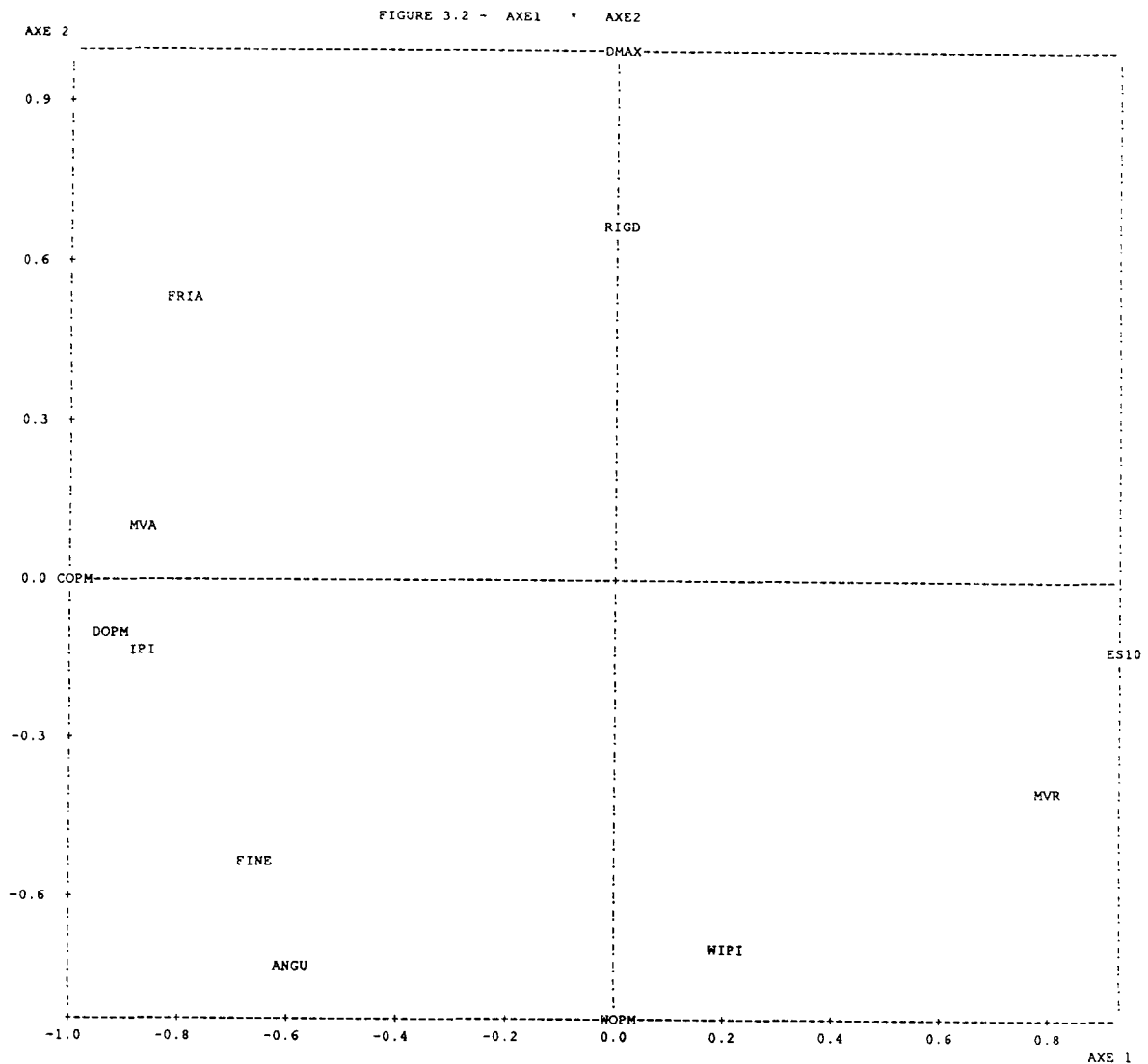
Les paramètres ANGU et FINES ont d'assez bonnes contributions sur les deux axes. En effet, la présence de fines diminue l'indice de vide tout en augmentant la capacité du matériau à retenir l'eau et accroît son pouvoir de compactage.

Le troisième axe bénéficie le plus des contributions de RIGD, WIPI et WOPM. Cet axe représente la phase interstitielle (eau+air).

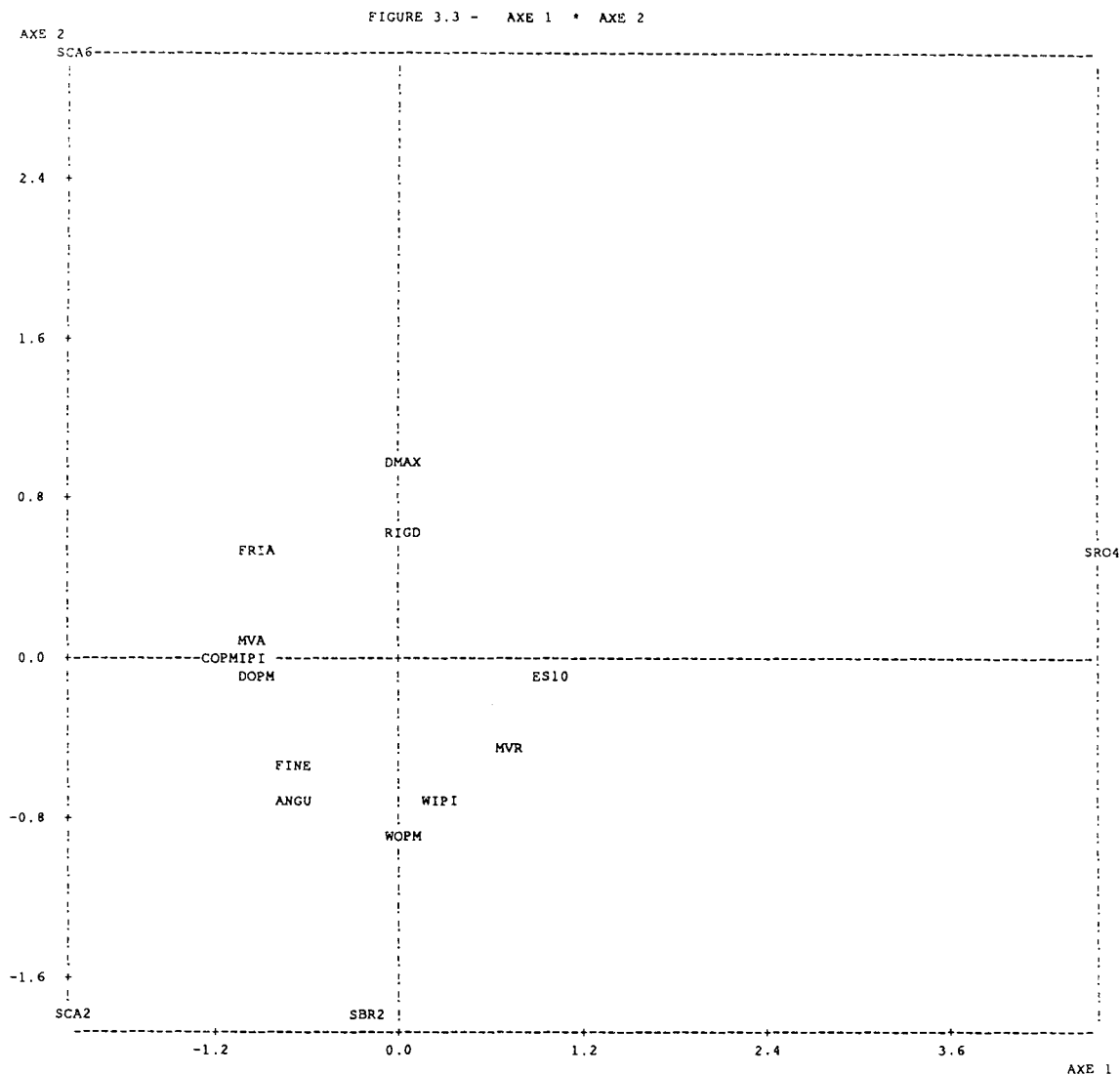
TABEAU 3.14 - COORDONNEES, CONTRIBUTIONS ET COSINUS CARRES DES INDIVIDUS SUR LES AXES 1 A 4

INDIVIDUS			COORDONNEES						CONTRIBUTIONS						COSINUS CARRES					
IDENTIFICATEUR	P.REL	DISTO	1	2	3	4	0		1	2	3	4	0		1	2	3	4	0	
SRO4	25.00	19.26	4.31	0.52	-0.68	0.00	0.00		68.3	1.7	5.0	0.0	0.0		0.96	0.01	0.02	0.00	0.00	
SBR2	25.00	8.19	-0.16	-1.78	2.23	0.00	0.00		0.1	20.2	54.7	0.0	0.0		0.00	0.39	0.61	0.00	0.00	
SCA2	25.00	11.05	-2.09	-1.77	-1.89	0.00	0.00		16.1	19.8	39.1	0.0	0.0		0.40	0.28	0.32	0.00	0.00	
SCA6	25.00	13.50	-2.06	3.03	0.33	0.00	0.00		15.6	58.2	1.2	0.0	0.0		0.31	0.68	0.01	0.00	0.00	

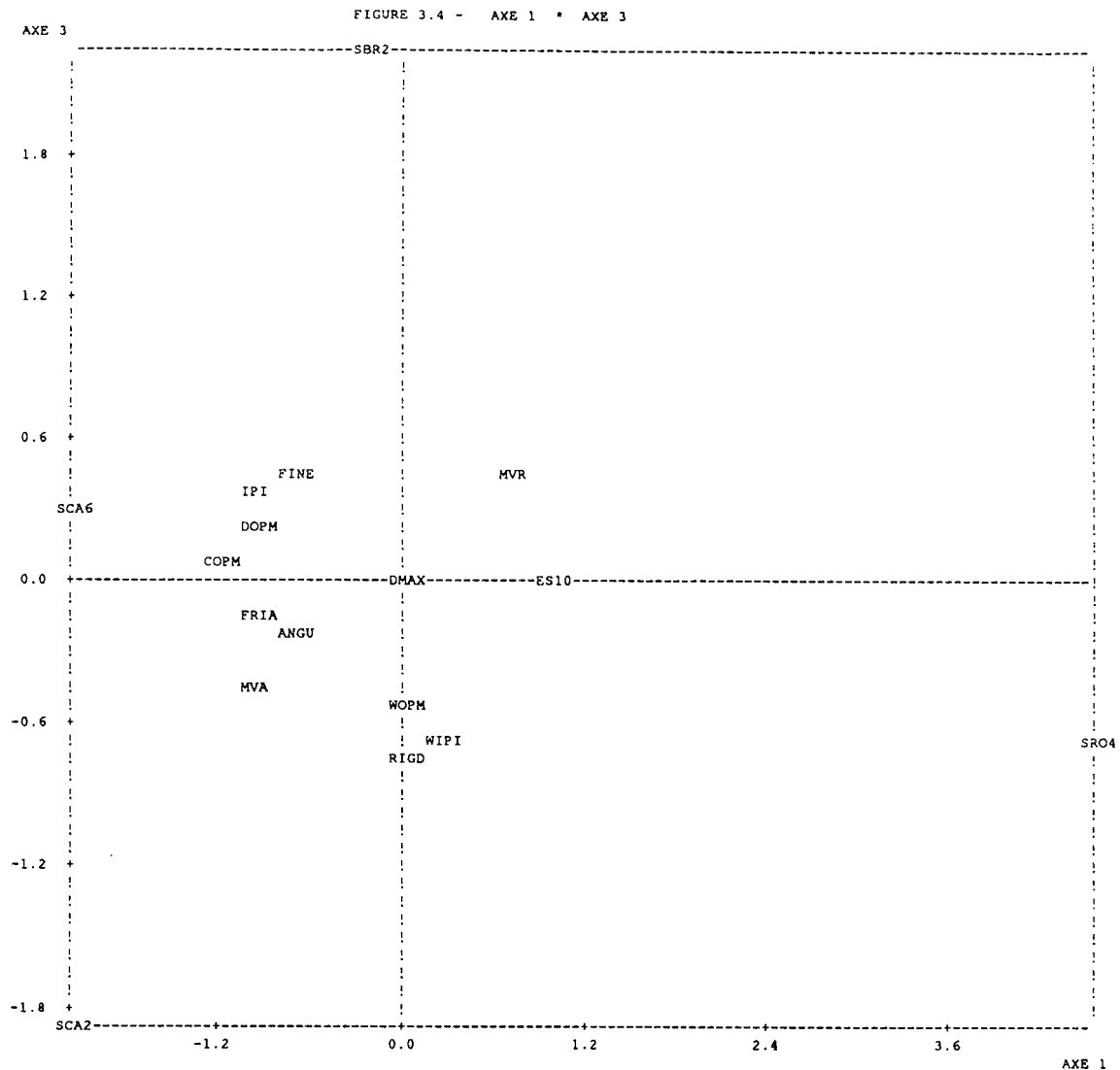
On va maintenant attribuer chaque matériau aux axes factoriels à partir du tableau 3.14. Le sable roulé de Loire, un sable propre et qui réagit moins bien au compactage contribue le plus sur le premier axe. Dans la partie négative de cet axe se trouvent les matériaux les plus pollués et qui se compactent le mieux SCA2 et SCA6. La grande contribution de SCA6, matériau de plus grande taille maximale (6 mm) et qui comporte le plus de vides, explique le plus le second axe. A l'opposé sur cet axe, se situent les deux matériaux les plus fins SBR2 et SCA2. Le sable broyé de Loire contribue le plus à l'inertie expliquée par le 3ème axe. Ce matériau contient le plus de fines et le moins de vide. SCA2 contribue aussi beaucoup sur cet axe, sa teneur en eau OPM est la plus élevée.



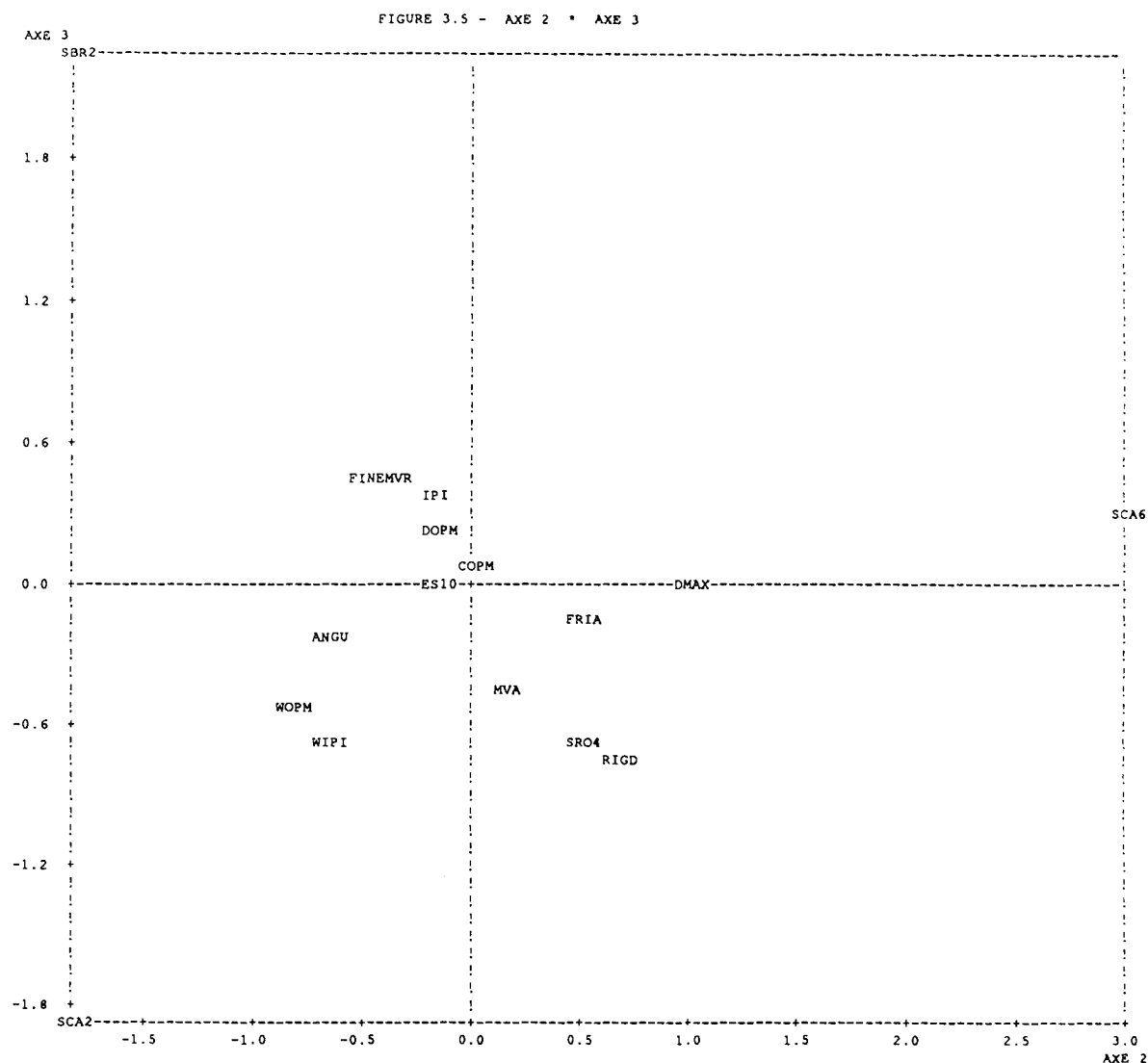
La figure 3.2 représente le nuage des variables projetées sur le plan factoriel engendré par les axes 1 et 2. Elle illustre les interprétations, faites auparavant, sur les corrélations entre les variables et leurs contributions sur les axes factoriels. Ces variables se répartissent sur le plan par sous-groupe. Sur le premier axe, le sous-groupe "COPM-DOPM-IPI-MVA" caractérisant l'aptitude au compactage s'oppose au sous-groupe "ES10-MVR", ES10 caractérisant la propreté. Sur l'axe factoriel 2 le couple "DMAX-RIGD" caractérisant l'arrangement des grains (squelette+vides) s'oppose au couple "WIPM-WIPI" qui définit le pouvoir du matériau à retenir de l'eau. En outre, il y a le sous-groupe "FINE-ANGU" qui contribue à la fois sur les deux axes 1 et 2. Il reste le paramètre FRIA qui, selon sa position sur le plan agit sur le comportement au compactage du matériau.



La figure 3.3 constitue une représentation simultanée des variables et individus sur le plan factoriel 1x2. Au niveau du nuage des individus, ce plan montre le rapprochement entre le sable broyé de Loire 0/2 (SBR2) et le sable broyé calcaire 0/2 (SCA2), deux matériaux à écoulement difficile, par rapport aux deux autres sables SCA6 et SRO4 qui s'écoulent plus facilement mais qui sont bien distincts. Cela reflète un peu les différences de comportement observées pendant les essais d'écoulement. On va alors dégager à partir de cette représentation simultanée les paramètres susceptibles de caractériser et différencier le plus ces 4 matériaux vis-à-vis de leurs propriétés d'écoulement. Le sable roulé de Loire (SRO4), à écoulement facile, se distingue des trois autres matériaux par sa propreté et son faible pouvoir de compactage. Ces deux paramètres ne permettent pas, par contre, de bien dissocier les trois sables broyés (SBR2, SCA2 et SCA6) pourtant SCA6 s'écoule mieux que SCA2 et SBR2. Il apparaît que le sable broyé calcaire 0/6 (SCA6) se distingue surtout par sa taille maximale DMAX (6 mm) et son indice de vide RIGD (le plus élevé). SCA2 et SBR2 se distinguent par leurs teneurs en fines élevées qui accroissent le temps d'écoulement à l'angulomètre (ANGU) et favorise l'affinité avec l'eau (WOPM et WIPI). Il reste maintenant à voir les différences entre le sable broyé calcaire 0/2 (SCA2) et le sable broyé de Loire 0/2 (SBR2). Le plan factoriel 1x3 ci-dessous en donne plus de détails.



La figure 3.4 représente simultanément les variables et les individus dans le plan factoriel 1x3. En ce qui concerne les variables ce plan met bien en évidence la différence entre le sable broyé de Loire (SBR2) et le sable broyé calcaire 0/2 (SCA2). Concernant les individus, certains groupements rencontrés dans 1x2 subsistent mais certains éléments se sont dissociés : le sous-groupe "DOPM, COPM, IPP" quitté par MVA et rejoint par FINE, le sous-groupe "WOPM, WIPI" rejoint par RIGD et le sous-groupe "MVR, ES10". DMAX se trouve mal représenté sur le plan 1x3 (cf tableau 3.13), le sable broyé de Loire (SBR2) se distingue par sa teneur en fines la plus élevée et son faible indice de vide comparativement au sable calcaire 0/2 qui contient plus d'eau à l'optimum Proctor. C'est donc par les trois paramètres teneur en fines, teneur en eau et indice de vide (RIGD) que les deux matériaux à écoulement difficile SCA2 et SBR2 diffèrent le plus l'un de l'autre.



Le plan factoriel 2x3 met directement en jeu les trois sables broyés SCA2, SCA6 et SBR2 car le sable roulé de Loire s'y trouve mal représenté (cf tableau 3.14). Ce plan montre les paramètres qui distinguent ces 3 matériaux en se référant à leurs comportements à l'écoulement et résume les analyses faites avec les plans 1x2 et 1x3. Il s'agit des paramètres suivants : taille maximale (DMAX), indice de vide (RIGD), teneur en fines (FINE), temps d'écoulement à l'angulomètre (ANGU), teneur en eau (WOPM, WIPI). Ces paramètres apparaissent bien après avoir éliminé les variables mal représentées sur la figure, à savoir ES10, COPM, DOPM, IPI, MVA. Les caractéristiques liées au compactage et à la propreté ne permettent donc pas de bien distinguer les matériaux de type B (cf 3.1.1) avec fines. Ainsi on peut les mettre au second plan pour l'étude du dosage des matériaux avec fines.

TABLEAU 3.15 - MATRICE DES CORRELATIONS

	!	SRL4	SBL2	SCL2	SCL6
SRL4	!	1.00			
SBL2	!	0.59	1.00		
SCL2	!	0.54	0.95	1.00	
SCL6	!	0.46	0.93	0.95	1.00

Lorsque l'analyse du tableau 3.5 est effectuée en mettant en colonne les matériaux et en ligne les paramètres mesurés, elle donne une matrice des corrélations entre les 4 matériaux (tableau 3.15). Cette matrice montre la différence entre le sable roulé de Loire (SRO4) et les 3 autres matériaux (broyés avec fines). Ces derniers se trouvent par contre fortement corrélés vis-à-vis de l'ensemble des paramètres étudiés. D'après l'analyse faite ci-dessus les paramètres susceptibles de faire apparaître leurs différences de comportement à l'écoulement sont : la taille maximale des grains, la teneur en fines, la teneur en eau, l'indice de vide et le temps d'écoulement à l'angulomètre. Ce dernier paramètre représente une propriété du matériau à l'écoulement donc il dépend des autres paramètres.

3.3.2.2 - CARACTERISITQUES PHYSICO-GEOMETRIQUES DES MATERIAUX AVEC FINES

L'interprétation porte sur les résultats du traitement du tableau 3.6.

Le tableau 3.6 concerne les trois sables broyés SBR2, SCA2 et SCA6 qui apparaissent fortement corrélés par rapport aux paramètres étudiés précédemment (tableau 3.5). De nouveaux paramètres qui caractérisent les fines sont introduits dans ce tableau afin de mieux comparer ces trois matériaux.

TABLEAU 3.16 - STATISTIQUES SOMMAIRES DES VARIABLES CONTINUES

EFFECTIF TOTAL : 3
POIDS TOTAL : 3.00

NUM	IDEN - LIBELLE	EFFECTIF	POIDS	MOYENNE	ECART-TYPE	MINIMUM	MAXIMUM
1	DMAX - dimension maximale	3	3.00	3.33	1.89	2.00	6.00
2	ANGU - ecoulement angulomet	3	3.00	32.67	10.62	20.00	46.00
3	ES10 - equivalent sable	3	3.00	48.33	10.10	37.90	62.00
4	FINE - teneur en fines	3	3.00	15.00	4.08	10.00	20.00
5	BLEU - valeur de bleu fines	3	3.00	1.13	0.33	0.70	1.50
6	SSB - surface specifique B	3	3.00	2558.00	416.31	2185.00	3139.00
7	DOPM - densite optim. Proct	3	3.00	2.02	0.02	2.00	2.04
8	WOPM - teneur en eau OPM	3	3.00	8.03	0.78	7.10	9.00
9	IPI - indice portant immed	3	3.00	82.33	6.24	74.00	89.00
10	WIPI - teneur en eau IPI	3	3.00	7.53	0.95	6.50	8.80
11	RIGD - indice Rigden toute	3	3.00	29.70	2.84	25.75	32.26
12	RIGF - indice Rigden fines	3	3.00	38.59	0.51	38.04	39.26
13	MVR - masse vol. reel. tou	3	3.00	2.56	0.03	2.54	2.61
14	MVRF - masse vol. reel. fin	3	3.00	2.61	0.01	2.60	2.63
15	MVA - masse vol. abs. tout	3	3.00	2.65	0.02	2.63	2.67
16	MVAF - masse vol. abs. fine	3	3.00	2.64	0.00	2.64	2.64
17	FRIA - friabilite	3	3.00	32.96	10.44	18.76	43.58
18	COPM - Compacite a OPM	3	3.00	78.95	1.58	76.77	80.47

TABLEAU 3.17 - MATRICE DES CORRELATIONS

	DMAX	ANGU	ES10	FINE	BLEU	SSB	DOPM	WOPM	IPI	WIPI	RIGD	RIGF	MVR	MVRF	MVA	MVAF	FRIA	COPM
DMAX	1.00																	
ANGU	-0.84	1.00																
ES10	-0.73	0.25	1.00															
FINE	-0.87	0.46	0.97	1.00														
BLEU	0.79	-0.33	-1.00	-0.99	1.00													
SSB	-0.35	0.80	-0.38	-0.16	0.30	1.00												
DOPM	0.69	-0.20	-1.00	-0.96	0.99	0.43	1.00											
WOPM	-0.85	1.00	0.26	0.47	-0.34	0.79	-0.21	1.00										
IPI	0.19	-0.69	0.53	0.33	-0.46	-0.99	-0.58	-0.68	1.00									
WIPI	-0.77	0.99	0.12	0.34	-0.20	0.87	-0.07	0.99	-0.78	1.00								
RIGD	0.64	-0.12	-0.99	-0.94	0.98	0.50	1.00	-0.14	-0.64	0.01	1.00							
RIGF	0.94	-0.60	-0.92	-0.99	0.95	-0.01	0.90	-0.61	-0.16	-0.50	0.87	1.00						
MVR	-0.67	0.16	1.00	0.95	-0.98	-0.46	-1.00	0.17	0.61	0.03	-1.00	-0.88	1.00					
MVRF	-0.19	-0.37	0.81	0.65	-0.76	-0.85	-0.84	-0.36	0.93	-0.49	-0.88	-0.52	0.86	1.00				
MVA	0.28	0.28	-0.86	-0.72	0.81	0.80	0.88	0.27	-0.89	0.40	0.92	0.59	-0.90	-1.00	1.00			
MVAF	0.50	-0.89	0.23	0.00	-0.14	-0.99	-0.28	-0.88	0.94	-0.94	-0.35	0.17	0.31	0.76	-0.69	1.00		
FRIA	0.72	-0.23	-1.00	-0.97	0.99	0.40	1.00	-0.25	-0.55	-0.10	0.99	0.92	-1.00	-0.82	0.87	-0.24	1.00	
COPM	0.68	-0.18	-1.00	-0.96	0.99	0.44	1.00	-0.20	-0.59	-0.05	1.00	0.89	-1.00	-0.85	0.89	-0.29	1.00	1.00

Au lieu de reprendre l'analyse de la matrice des corrélations (tableau 3.17), il semble plus intéressant de voir comment évoluent les corrélations du tableau 3.10 lorsque quelques paramètres s'ajoutent dans le tableau des données et que le sable roulé de Loire n'y figure plus. Les deux groupes signalés auparavant (tableau 3.10) apparaissent aussi dans la nouvelle matrice mais il y a des modifications en ce qui concerne leurs éléments :

- dans le premier groupe, de fortes corrélations existent entre COPM, DOPM, FRIA, RIGD et BLEU. MVA et RIGF entretiennent aussi de bonnes corrélations avec ces variables. ES10 et MVR, fortement corrélés, figurent aussi dans ce groupe mais avec leurs effets s'opposent à ceux des paramètres précédents. Ces deux paramètres ont de bonnes corrélations avec FINE et MVRF. A part les nouveaux paramètres relatifs aux fines, les principales modifications dans ce groupe sont la disparition de IPI pour s'intégrer dans le 2ème groupe et l'apparition de l'indice de vide (RIGD, RIGF) qui figurait avant dans celui-ci. Le rapport de corrélation de -1 entre ES10 et BLEU montre bien que ces deux paramètres caractérisent la même propriété du matériau : la propreté.

- dans le second groupe figurent WOPM, WIPI et ANGU fortement corrélés entre eux et qui entretiennent de bonnes corrélations avec SSB. Ce dernier est bien corrélé avec IPI et MVAF. DMAX garde d'assez bonnes corrélations avec certains éléments de ce groupe.

TABLEAU 3.18 - HISTOGRAMME DES 18 PREMIERES VALEURS PROPRES

TABLEAU 3.19 - INTERVALLES LAPLACIENS D'ANDERSON AU SEUIL 0.95

ETENDUE ET POSITION RELATIVE DES INTERVALLES

Deux axes factoriels expliquent la totalité de l'inertie du nuage.

TABLEAU 3.20 - COORDONNEES DES VARIABLES SUR LES AXES 1 A 3

VARIABLES	COORDONNEES					CORRELATIONS VARIABLE-FACTEUR					ANCIENS AXES UNITAIRES				
IDEN - LIBELLE COURT	1	2	3	0	0	1	2	3	0	0	1	2	3	0	0
VARIABLES ACTIVES															
DMAX - dimension maximale	-0.65	-0.76	0.00	0.00	0.00	-0.65	-0.76	0.00	0.00	0.00	-0.19	-0.29	-0.07	0.00	0.00
ANGU - ecoulement angulomet	0.14	0.99	0.00	0.00	0.00	0.14	0.99	0.00	0.00	0.00	0.04	0.38	0.02	0.00	0.00
ES10 - equivalent sable	0.99	0.11	0.00	0.00	0.00	0.99	0.11	0.00	0.00	0.00	0.29	0.04	0.10	0.00	0.00
FINE - teneur en fines	0.94	0.33	0.00	0.00	0.00	0.94	0.33	0.00	0.00	0.00	0.28	0.13	0.10	0.00	0.00
BLEU - valeur de bleu fines	-0.98	-0.19	0.00	0.00	0.00	-0.98	-0.19	0.00	0.00	0.00	-0.29	-0.08	-0.09	0.00	0.00
SSB - surface specifique B	-0.48	0.88	0.00	0.00	0.00	-0.48	0.88	0.00	0.00	0.00	-0.14	0.34	-0.04	0.00	0.00
DOPM - densite optim. Proct	-1.00	-0.06	0.00	0.00	0.00	-1.00	-0.06	0.00	0.00	0.00	-0.30	-0.02	0.95	0.00	0.00
WOPM - teneur en eau OPM	0.15	0.99	0.00	0.00	0.00	0.15	0.99	0.00	0.00	0.00	0.05	0.38	0.03	0.00	0.00
IPI - indice portant immed	0.62	-0.78	0.00	0.00	0.00	0.62	-0.78	0.00	0.00	0.00	0.18	-0.30	0.05	0.00	0.00
WIPI - teneur en eau IPI	0.01	1.00	0.00	0.00	0.00	0.01	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.39	0.01	0.00	0.00
RIGD - indice Rigden toute	-1.00	0.02	0.00	0.00	0.00	-1.00	0.02	0.00	0.00	0.00	-0.30	0.01	-0.09	0.00	0.00
RIGF - indice Rigden fines	-0.87	-0.49	0.00	0.00	0.00	-0.87	-0.49	0.00	0.00	0.00	-0.26	-0.19	-0.09	0.00	0.00
MVR - masse vol. reel. tou	1.00	0.02	0.00	0.00	0.00	1.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.30	0.01	0.06	0.00	0.00
MVRF - masse vol. reel. fin	0.87	-0.50	0.00	0.00	0.00	0.87	-0.50	0.00	0.00	0.00	0.26	-0.19	0.08	0.00	0.00
MVA - masse vol. abs. tout	-0.91	0.41	0.00	0.00	0.00	-0.91	0.41	0.00	0.00	0.00	-0.27	0.16	-0.09	0.00	0.00
MVAF - masse vol. abs. fine	0.33	-0.94	0.00	0.00	0.00	0.33	-0.94	0.00	0.00	0.00	0.10	-0.37	0.02	0.00	0.00
FRIA - friabilite	-1.00	-0.09	0.00	0.00	0.00	-1.00	-0.09	0.00	0.00	0.00	-0.30	-0.04	-0.09	0.00	0.00
COPM - compacite a OPM	-1.00	-0.04	0.00	0.00	0.00	-1.00	-0.04	0.00	0.00	0.00	-0.30	-0.02	-0.09	0.00	0.00

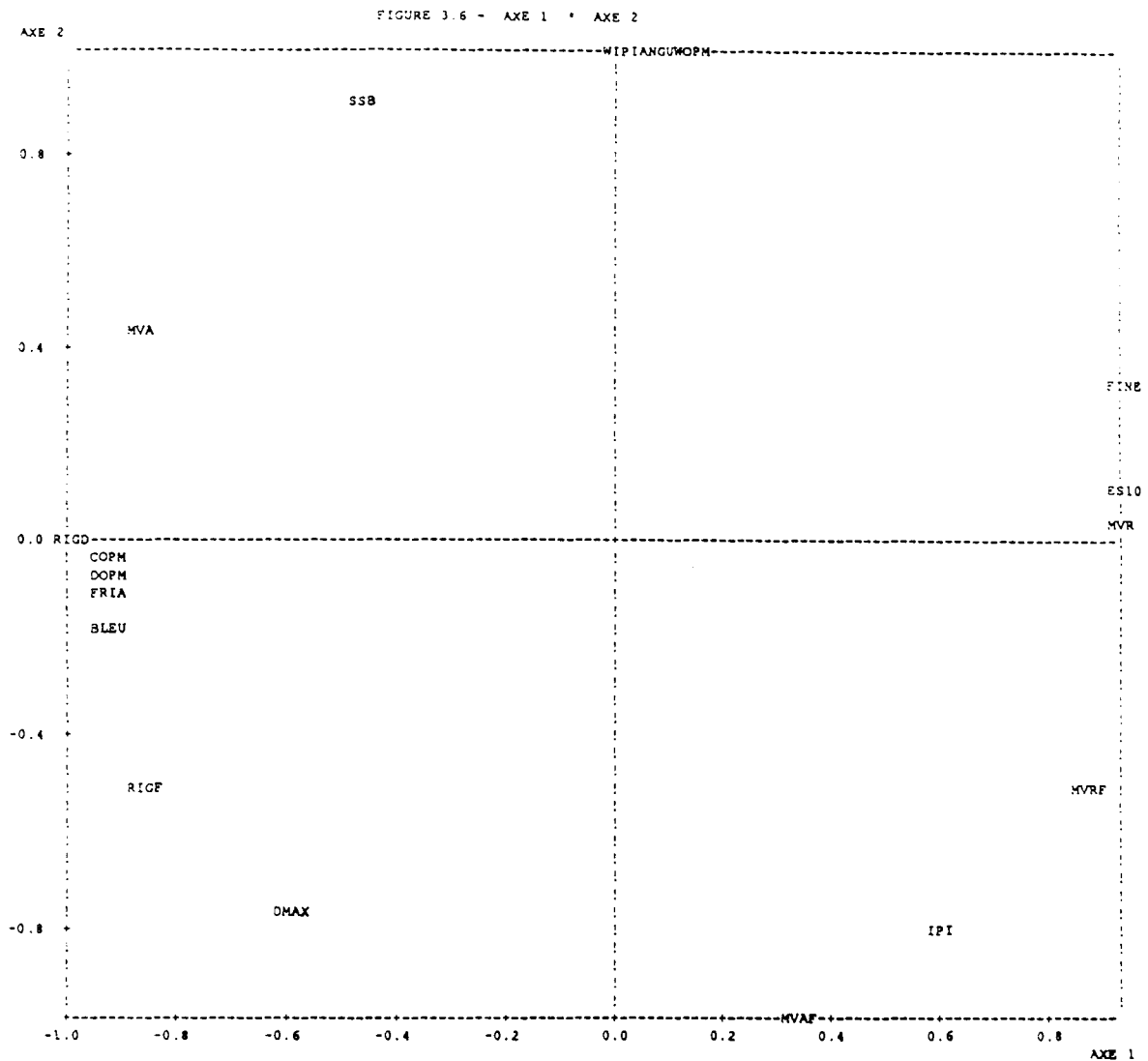
Le premier axe factoriel va encore être nommé "axe lié à l'aptitude au compactage et à la propreté". En effet, il bénéficie des grandes contributions de MVR, ES10, FINE et MVRF en signe positif puis de COPM, DOPM, FRIA, RIGD, BLEU, MVA et RIGF en signe négatif.

Le second axe est lié à la coulabilité du matériau à l'angulomètre (ANGU) et à sa capacité d'absorber de l'eau (WOPM, WIPI, SSB).

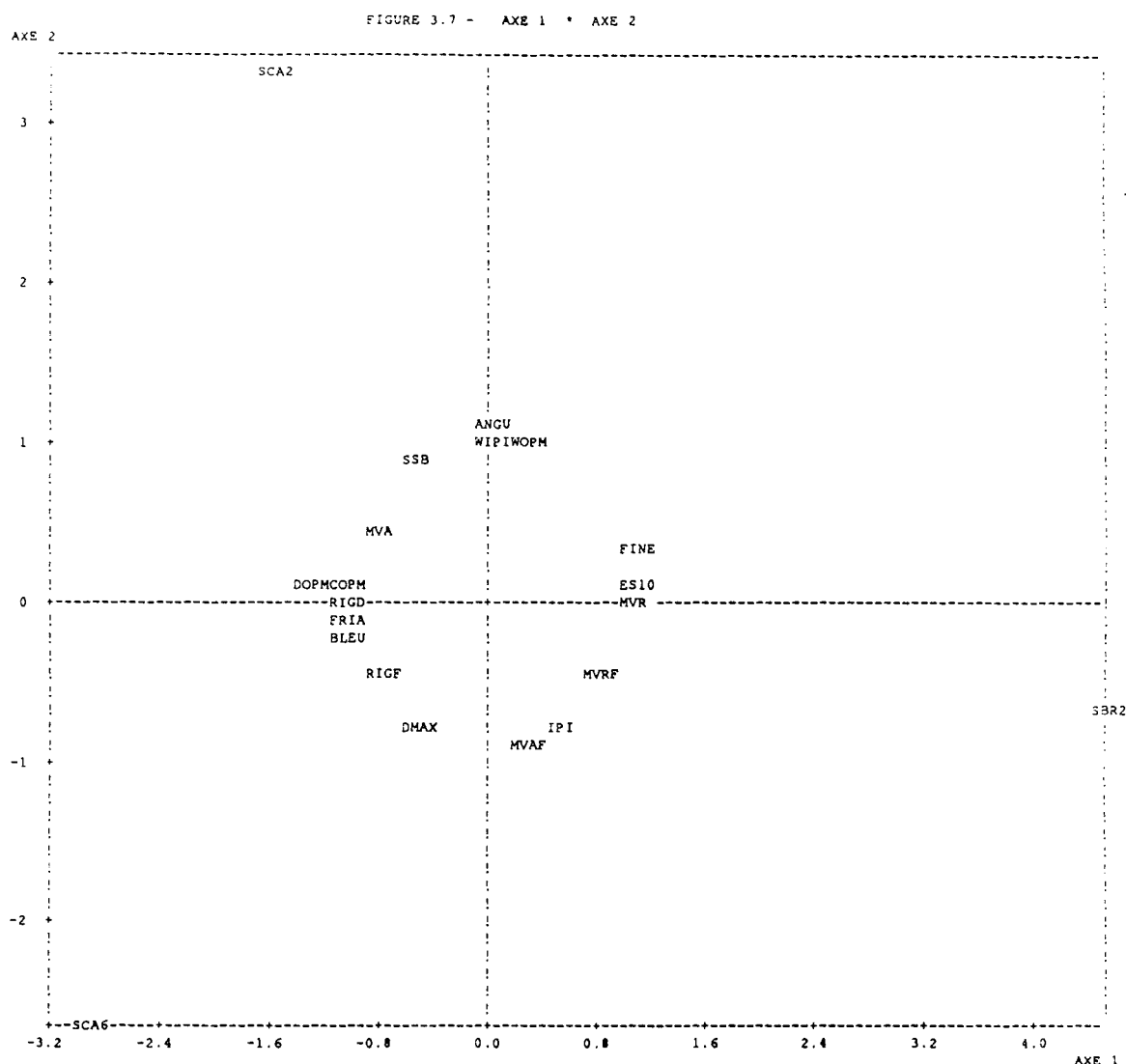
TABLEAU 3.21 - COORDONNEES, CONTRIBUTIONS ET COSINUS CARRES DES INDIVIDUS SUR LES AXES 1 A 3

INDIVIDUS			COORDONNEES					CONTRIBUTIONS					COSINUS CARRES				
IDENTIFICATEUR	P.REL	DISTO	1	2	3	0	0	1	2	3	0	0	1	2	3	0	0
SBR2	33.33	22.42	4.69	-0.67	0.00	0.00	0.00	64.4	2.3	0.0	0.0	0.0	0.98	0.02	0.00	0.00	0.00
SCA2	33.33	14.31	-1.58	3.44	0.00	0.00	0.00	7.4	59.3	0.0	0.0	0.0	0.18	0.82	0.00	0.00	0.00
SCA6	33.33	17.27	-3.10	-2.77	0.00	0.00	0.00	28.2	38.4	0.0	0.0	0.0	0.56	0.44	0.00	0.00	0.00

Le premier axe bénéficie de la grande contribution du sable broyé de Loire (SBR2) tandis que les deux sables calcaires contribuent le plus sur le second axe, notamment SCA2. Cette analyse peut donc mettre en évidence les paramètres qui mettent en différence les deux sables à écoulement difficile SBR2 et SCA2.



La figure 3.6 illustre bien les remarques faites sur la corrélation des variables et leurs contributions sur les axes factoriels. Suivant l'axe 1 le sous-groupe "COPM, DOPM, BLEU, FRIA, RIGD" renforcé par MVA et RIGF s'oppose avec le sous-groupe "ES10, MVR, FINE" renforcé par MVRF. Il s'agit de l'axe lié à la propreté et à l'aptitude au compactage. Suivant l'axe 2, se distingue surtout le sous-groupe constitué de WOPM, WIPI, ANGU et renforcé par SSB c'est-à-dire les paramètres caractérisant la coulabilité à l'angulomètre et la capacité du matériau à absorber de l'eau.



Sur la figure 7 qui représente simultanément les matériaux et leurs paramètres :

- le sable calcaire 0/2(SCA2) se distingue surtout par ANG U, WIPI, WOPM et SSB,
- le sable broyé de Loire (SBR2) avoisine surtout FINE, ES10 et MVR,
- le sable calcaire 0/6 (SCA6) se rapproche surtout de DMAX et RIGF.

Les paramètres qui peuvent différencier les 3 matériaux du point de vue écoulement figurent parmi ceux-ci. Les paramètres ES10 et MVR, ne pouvant pas établir de différence nette entre les deux sables calcaires (SCA2 et SCA6), sont à éliminer. Le paramètre ANG U représente un comportement à l'écoulement du matériau sec et dépend des autres caractéristiques du matériau. Finalement on retrouve les résultats de l'analyse du tableau 3.5 pour les paramètres qui différencient le plus les matériaux de type B avec fines (cf 3.1.1) : la taille maximale des grains, la teneur en fines, l'indice de vide, la teneur en eau, le temps d'écoulement à l'angulomètre et puis la surface spécifique des fines qui vient s'ajouter.

3.3.2.3 - COMPORTEMENT AU COMPACTAGE DES MATERIAUX AVEC FINES

L'interprétation porte sur les résultats du traitement du tableau 3.7

L'analyse du tableau 3.7 permettra de savoir comment les trois matériaux avec fines (SBL2, SCA2, SCA6) se comportent vis-à-vis du compactage (à la PCG).

TABLEAU 3.22 - STATISTIQUES SOMMAIRES DES VARIABLES CONTINUES

EFFECTIF TOTAL : 7
POIDS TOTAL : 7.00

NUM	IDEN - LIBELLE	EFFECTIF	POIDS	MOYENNE	ECART-TYPE	MINIMUM	MAXIMUM
1	SBL2 - sable broye de loire	7	7.00	71.77	9.62	57.70	83.60
2	SCL2 - sable calcaire 0/2	7	7.00	71.96	9.09	58.30	86.10
3	SCL6 - sable calcaire 0/6	7	7.00	71.94	8.78	57.90	84.30

TABLEAU 3.23 - MATRICE DES CORRELATIONS

	SBL2	SCL2	SCL6
SBL2	1.00		
SCL2	0.91	1.00	
SCL6	0.94	0.88	1.00

La matrice 3.23 montre de fortes corrélations entre les trois matériaux vis-à-vis des valeurs de la compacité à différentes teneurs en eau et différents nombres de girations. Ceci confirme les remarques faites sur la matrice 3.15. Bien qu'ils soient bien corrélés, ces 3 matériaux se comportent différemment à l'écoulement. Ainsi les essais PCG semblent ne pas pouvoir les caractériser vis-à-vis de ce dernier.

EDITION DES VALEURS PROPRES

APERCU DE LA PRECISION DES CALCULS : TRACE AVANT DIAGONALISATION 3.0000
SOMME DES VALEURS PROPRES 3.0000

TABLEAU 3.24 - HISTOGRAMME DES 3 PREMIERES VALEURS PROPRES

NUMERO	VALEUR PROPRE	POURCENT.	POURCENT. CUMULE
1	2.8219	94.06	94.06
2	0.1193	3.98	98.04
3	0.0588	1.96	100.00

TABLEAU 3.25 - INTERVALLES LAPLACIENS D'ANDERSON AU SEUIL 0.95

NUMERO	BORNE INFERIEURE	VALEUR PROPRE	BORNE SUPERIEURE
1	0.9101	2.8219	8.7497
2	0.0385	0.1193	0.3700
3	0.0190	0.0588	0.1823

ETENDUE ET POSITION RELATIVE DES INTERVALLES

1
2
3

3 axes factoriels expliquent la totalité de l'inertie du nuage dont 94,06 % par le premier axe.

TABLEAU 3.26 - COORDONNEES DES VARIABLES SUR LES AXES 1 A 3

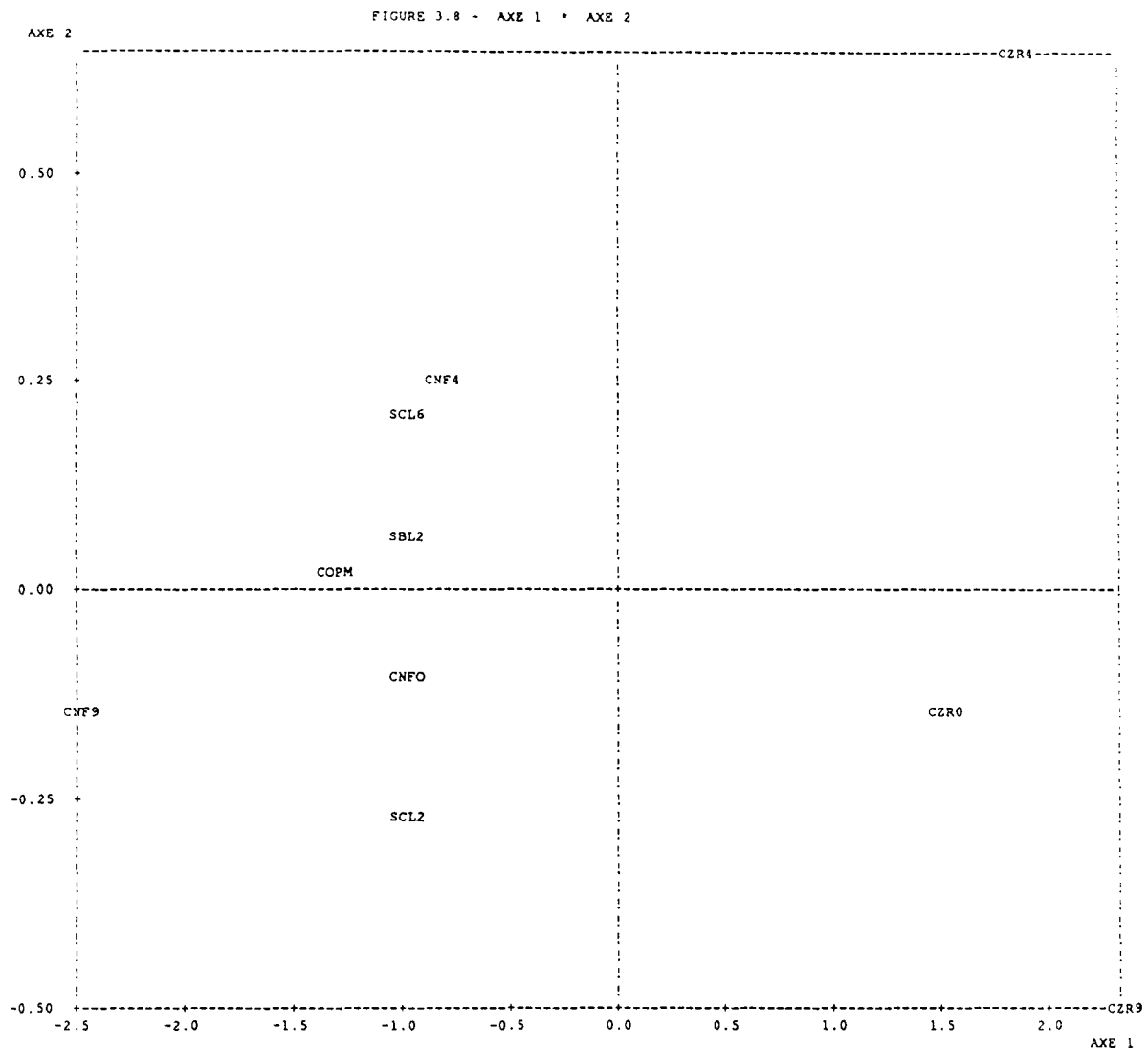
VARIABLES	COORDONNEES					CORRELATIONS VARIABLE-FACTEUR					ANCIENS AXES UNITAIRES				
IDEN - LIBELLE COURT	1	2	3	0	0	1	2	3	0	0	1	2	3	0	0
VARIABLES ACTIVES															
SBL2 - sable broyé de Loire	-0.98	0.06	-0.19	0.00	0.00	-0.98	0.06	-0.19	0.00	0.00	-0.58	0.17	-0.79	0.00	0.00
SCL2 - sable calcaire 0/2	-0.96	-0.27	0.06	0.00	0.00	-0.96	-0.27	0.06	0.00	0.00	-0.57	-0.78	0.25	0.00	0.00
SCL6 - sable calcaire 0/6	-0.97	0.21	0.13	0.00	0.00	-0.97	0.21	0.13	0.00	0.00	-0.58	0.60	0.55	0.00	0.00

Les trois matériaux ont pratiquement les mêmes contributions. Celles-ci se concentrent sur l'axe factoriel 1. Ceci traduit les bonnes corrélations entre ces matériaux. Les contributions des sables calcaires font le plus l'axe 2 et celle du sable broyé de Loire (SBR2) fait le plus l'axe 3. Il semble alors plus intéressant d'étudier le nuage sur le plan 2x3 mais compte tenu des mauvaises qualités de représentation des individus sur ce plan (tableau 3.27) il n'en vaut pas la peine. Il reste à l'étudier sur les plans 1x2 et 1x3.

TABLEAU 3.27 - COORDONNEES, CONTRIBUTIONS ET COSINUS CARRES DES INDIVIDUS SUR LES AXES 1 A 3

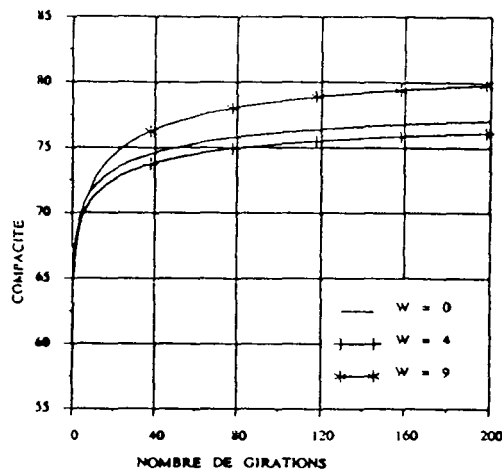
INDIVIDUS			COORDONNEES					CONTRIBUTIONS					COSINUS CARRES				
IDENTIFICATEUR	P.REL	DISTO	1	2	3	0	0	1	2	3	0	0	1	2	3	0	0
CNFO	14.29	1.09	-0.95	-0.11	-0.41	0.00	0.00	4.6	1.3	41.6	0.0	0.0	0.83	0.01	0.16	0.00	0.00
CZR0	14.29	2.18	1.47	-0.16	-0.02	0.00	0.00	10.9	3.0	0.1	0.0	0.0	0.99	0.01	0.00	0.00	0.00
CNF4	14.29	0.80	-0.81	0.26	-0.27	0.00	0.00	3.3	8.1	17.8	0.0	0.0	0.82	0.09	0.09	0.00	0.00
CZR4	14.29	3.61	1.78	0.66	0.12	0.00	0.00	16.0	52.2	3.3	0.0	0.0	0.88	0.12	0.00	0.00	0.00
COPM	14.29	1.93	-1.35	0.02	0.34	0.00	0.00	9.2	0.1	27.4	0.0	0.0	0.94	0.00	0.06	0.00	0.00
CNF9	14.29	5.91	-2.42	-0.16	0.19	0.00	0.00	29.6	3.0	9.1	0.0	0.0	0.99	0.00	0.01	0.00	0.00
CZR9	14.29	5.48	2.28	-0.52	0.06	0.00	0.00	26.4	32.4	0.7	0.0	0.0	0.95	0.05	0.00	0.00	0.00

Les contributions des individus se répartissent bien sur les trois axes mais les bonnes qualités de représentation se concentrent sur le seul premier axe. Autrement dit le nuage des individus se projette mal sur le plan 2x3.

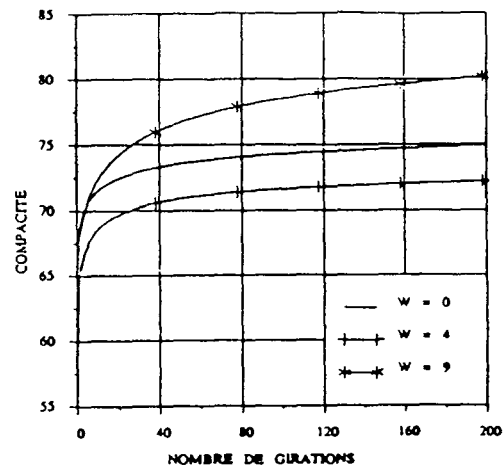


La projection du nuage sur le plan 1x2 (fig 3.8) montre que les trois matériaux sont assez groupés notamment par rapport aux compacités à nombre de girations infinis et à l'OPM. Du point de vue différence de comportement à l'écoulement, ce graphique ne donne pas d'information convaincante. Il en est de même pour le plan 1x3 qui donne des résultats très peu différents du plan 1x2. Par contre la figure 3.8 contient un renseignement intéressant pour le compactage : les compacités à zéro giration (CZRO, CZR4, CZR9) semblent n'avoir pas d'intérêt pour caractériser le pouvoir de compactage des 3 matériaux contrairement aux compacités à l'OPM et à infini girations. Les figures 3.9.a à f représentent les courbes PCG des trois matériaux établies avec la formule (3.1). Elles montrent que les sables 0/2 SBR2 et SCA2 se compactent mieux à 0 % d'eau qu'à 4 %. Apparemment les fines remplissent mieux les vides à 0 % d'eau qu'à 4 %. Mais lorsque la teneur en eau approche la valeur optimale Proctor le matériau se compacte bien. A faible teneur en eau le sable broyé de Loire se compacte plus que les deux sables calcaires mais à teneur en eau élevée cette tendance se renverse.

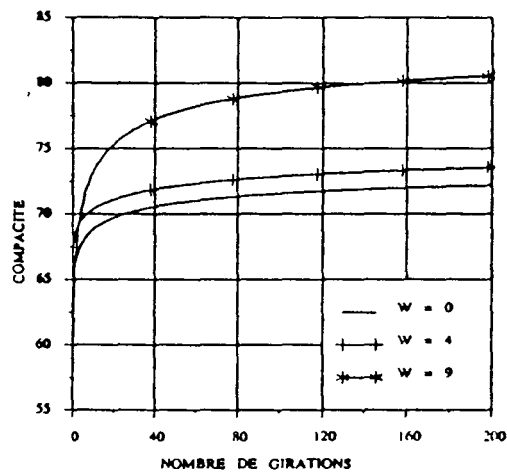
Figure 3.9 - Courbes P.C.G



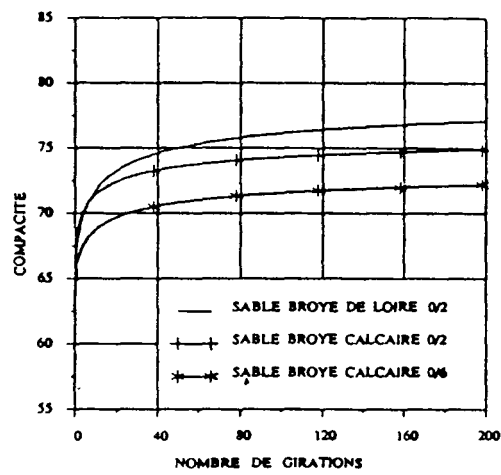
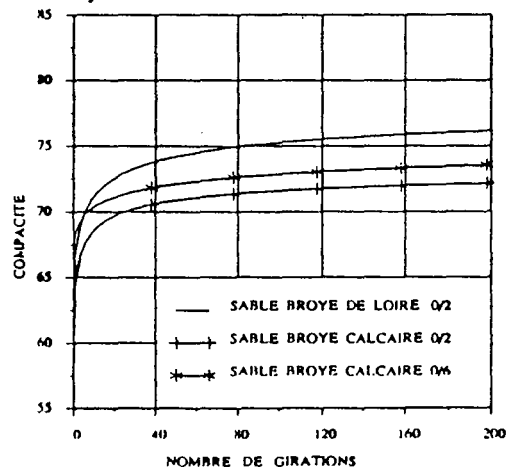
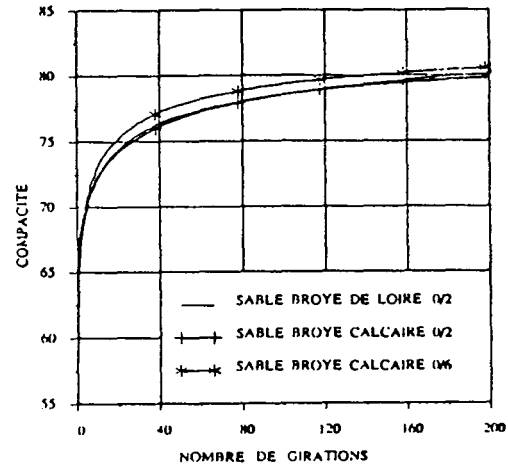
a) sable broyé de Loire 0/2



b) sable broyé calcaire 0/2



c) sable broyé calcaire 0/6

d) $w = 0$ e) $w = 4$ f) $w = 9$

Quatre axes factoriels expliquent l'inertie globale du nuage dont 86,30 % par les trois premiers.

TABEAU 3.32 - COORDONNEES DES VARIABLES SUR LES AXES 1 A 4

VARIABLES	COORDONNEES					CORRELATIONS VARIABLE-FACTEUR					ANCIENS AXES UNITAIRES				
IDEN - LIBELLE COURT	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0
VARIABLES ACTIVES															
DENS - poids volumique vrac	-0.15	0.98	0.09	-0.05	0.00	-0.15	0.98	0.09	-0.05	0.00	-0.09	0.98	0.15	-0.11	0.00
EAU - teneur en eau	0.88	0.21	-0.38	0.21	0.00	0.88	0.21	-0.38	0.21	0.00	0.56	0.20	-0.64	0.49	0.00
COHE - cohésion apparente	0.88	-0.02	0.45	0.15	0.00	0.88	-0.02	0.45	0.15	0.00	0.56	-0.02	0.75	0.34	0.00
FROT - frottement interne	-0.94	0.02	0.05	0.34	0.00	-0.94	0.02	0.05	0.34	0.00	-0.60	0.02	0.09	0.79	0.00

Suivant les contributions des variables (tableau 3.32) les quatre axes factoriels peuvent avoir les nominations suivantes :

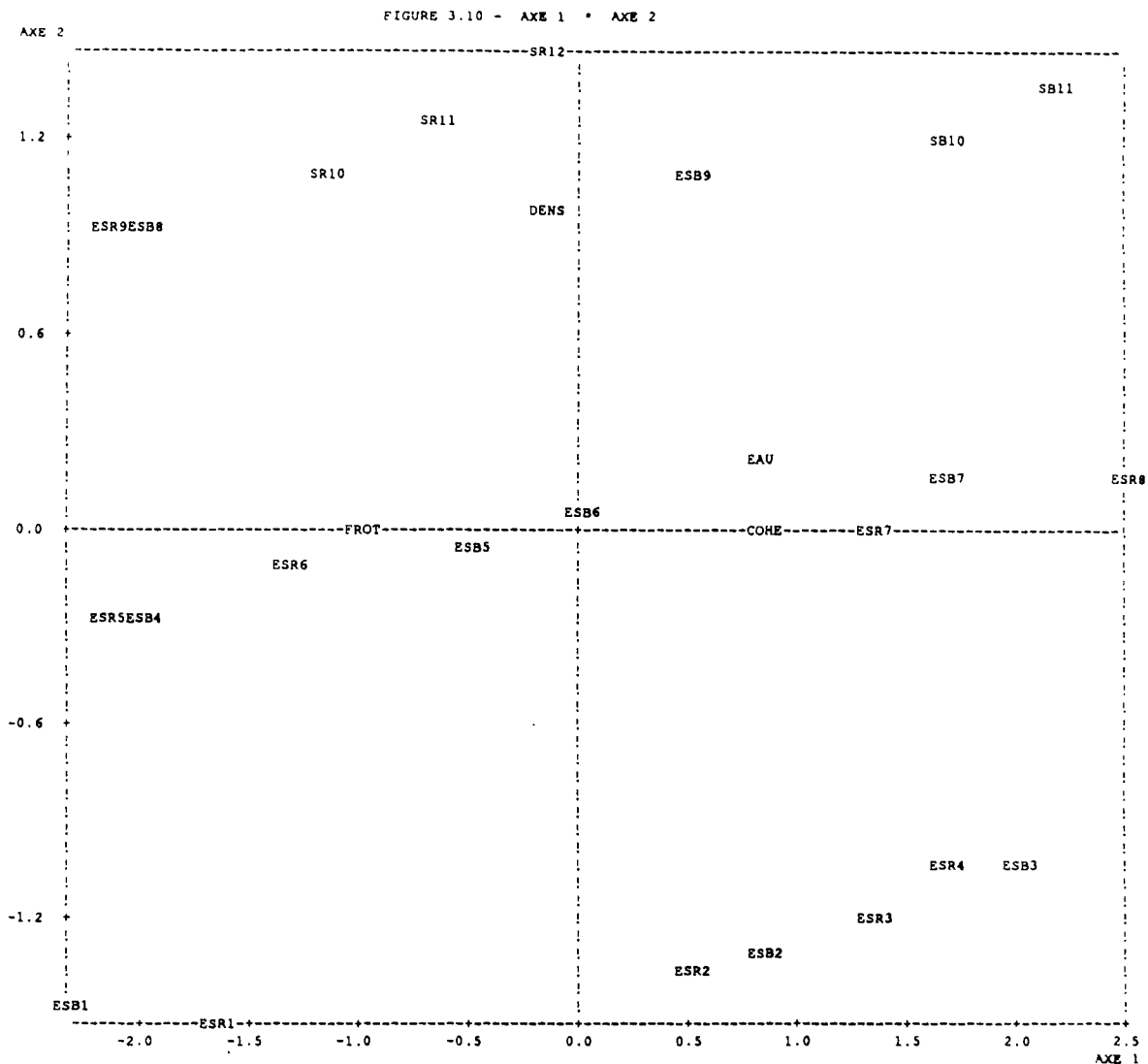
- axe 1 : paramètres de cisaillement et teneur en eau
- axe 2 : poids volumique apparent
- axe 3 : cohésion apparente
- axe 4 : angle de frottement interne.

TABLEAU 3.33 - COORDONNEES, CONTRIBUTIONS ET COSINUS CARRES DES INDIVIDUS SUR LES AXES 1 A 4

INDIVIDUS			COORDONNEES					CONTRIBUTIONS					COSINUS CARRES				
IDENTIFICATEUR	P.REL	DISTO	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0
ESR1	4.35	5.05	-1.66	-1.51	0.10	-0.12	0.00	4.9	9.8	0.1	0.3	0.0	0.54	0.45	0.00	0.00	0.00
ESR2	4.35	2.64	0.54	-1.39	0.35	-0.55	0.00	0.5	8.3	1.5	7.1	0.0	0.11	0.73	0.05	0.11	0.00
ESR3	4.35	3.12	1.28	-1.21	0.11	0.03	0.00	2.9	6.3	0.2	0.0	0.0	0.52	0.47	0.00	0.00	0.00
ESR4	4.35	4.40	1.67	-1.03	-0.44	0.59	0.00	5.0	4.6	2.3	8.1	0.0	0.64	0.24	0.04	0.08	0.00
ESR5	4.35	4.96	-2.17	-0.28	0.34	0.26	0.00	8.4	0.3	1.4	1.6	0.0	0.95	0.02	0.02	0.01	0.00
ESR6	4.35	1.76	-1.28	-0.12	-0.28	0.17	0.00	2.9	0.1	1.0	0.7	0.0	0.93	0.01	0.05	0.02	0.00
ESR7	4.35	3.10	1.35	-0.01	0.98	0.57	0.00	3.2	0.0	11.5	7.7	0.0	0.58	0.00	0.31	0.11	0.00
ESR8	4.35	6.87	2.43	0.15	0.69	0.70	0.00	10.5	0.1	5.7	11.4	0.0	0.86	0.00	0.07	0.07	0.00
ESR9	4.35	5.46	-2.09	0.92	0.49	-0.13	0.00	7.8	3.7	2.9	0.4	0.0	0.80	0.16	0.04	0.00	0.00
SR10	4.35	2.69	-1.20	1.09	-0.13	-0.22	0.00	2.6	5.1	0.2	1.2	0.0	0.53	0.44	0.01	0.02	0.00
SR11	4.35	2.64	-0.70	1.27	-0.69	0.21	0.00	0.9	7.0	5.8	1.0	0.0	0.19	0.61	0.18	0.02	0.00
SR12	4.35	4.14	-0.21	1.45	-1.26	0.64	0.00	0.1	9.1	18.9	9.6	0.0	0.01	0.51	0.38	0.10	0.00
ESB1	4.35	8.38	-2.34	-1.49	0.20	0.79	0.00	9.8	9.5	0.5	14.6	0.0	0.66	0.26	0.00	0.08	0.00
ESB2	4.35	3.05	0.90	-1.33	0.14	-0.67	0.00	1.5	7.6	0.2	10.4	0.0	0.27	0.58	0.01	0.15	0.00
ESB3	4.35	5.51	1.93	-1.04	-0.83	-0.21	0.00	6.6	4.6	8.2	1.0	0.0	0.67	0.19	0.12	0.01	0.00
ESB4	4.35	4.06	-1.97	-0.29	0.31	0.00	0.00	6.9	0.4	1.1	0.0	0.0	0.96	0.02	0.02	0.00	0.00
ESB5	4.35	0.86	-0.42	-0.08	-0.57	-0.59	0.00	0.3	0.0	3.9	8.2	0.0	0.21	0.01	0.38	0.41	0.00
ESB6	4.35	1.14	-0.01	0.07	-1.04	-0.23	0.00	0.0	0.0	13.0	1.3	0.0	0.00	0.00	0.95	0.05	0.00
ESB7	4.35	3.36	1.68	0.18	-0.68	-0.24	0.00	5.0	0.1	5.6	1.3	0.0	0.84	0.01	0.14	0.02	0.00
ESB8	4.35	5.09	-1.99	0.92	0.48	-0.26	0.00	7.0	3.6	2.7	1.6	0.0	0.78	0.17	0.05	0.01	0.00
ESB9	4.35	2.18	0.47	1.10	0.53	-0.68	0.00	0.4	5.2	3.4	10.8	0.0	0.10	0.56	0.13	0.21	0.00
SB10	4.35	5.08	1.68	1.22	0.84	-0.21	0.00	5.1	6.4	8.4	1.1	0.0	0.56	0.29	0.14	0.01	0.00
SB11	4.35	6.44	2.10	1.37	0.37	0.15	0.00	7.8	8.1	1.6	0.5	0.0	0.68	0.29	0.02	0.00	0.00

Suivant l'importance de leurs contributions les individus se répartissent sur les axes factoriels en fonction des valeurs des quatre variables mesurées :

- axe 1 : échantillon de forte valeur de la cohésion ou de l'angle de frottement interne ou de la teneur en eau (ESR8, ESB1, ESR5, SB11, ESB8, ESB4, ESB3, SB10,...)
- axe 2 : échantillon de plus faible ou de plus forte valeur du poids volumique apparente (ESR1, ESB1, SR12, ESR2, SB11, ESB2, SR11,...).
- axe 3 : échantillon à forte ou sans cohésion apparente (SR12, ESB6, SB10, SB3, SR11,...)
- axe 4 : échantillon très ou faiblement frottant (ESB1, SR8, ESB9, ESB2, SR12,...).



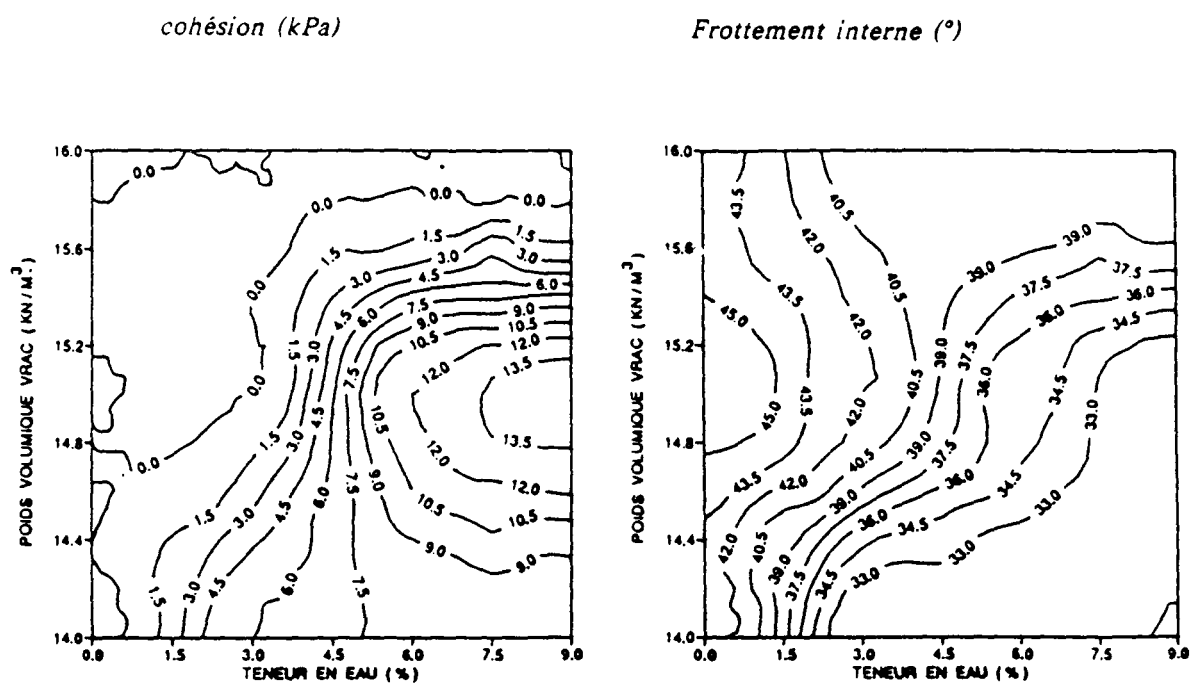
La figure 3.10 représente simultanément les variables et les individus sur le plan factoriel 1x2. Elle montre bien que les trois paramètres teneur en eau (EAU), cohésion (COHE) et frottement (FROT) justifient l'axe 1 tandis que le poids volumique (MASS) justifie l'axe 2. Les individus (essais) se répartissent en trois groupes suivant le poids volumique de l'échantillon (14 ou 15 ou 16 kN/m³). Les individus ESB5 et ESB6 sont mal représentés sur ce plan (cf tableau 3.33). On peut distinguer la répartition suivante sur la figure :

- bas à gauche : échantillons de faible à moyenne densité et sans cohésion. Leurs teneurs en eau sont faibles. Cette partie se compose aussi bien du sable roulé de Loire que du sable broyé de Loire.
- bas à droite : échantillons de faible densité et pourvus de cohésion apparente. Les deux matériaux figurent dans cette partie.

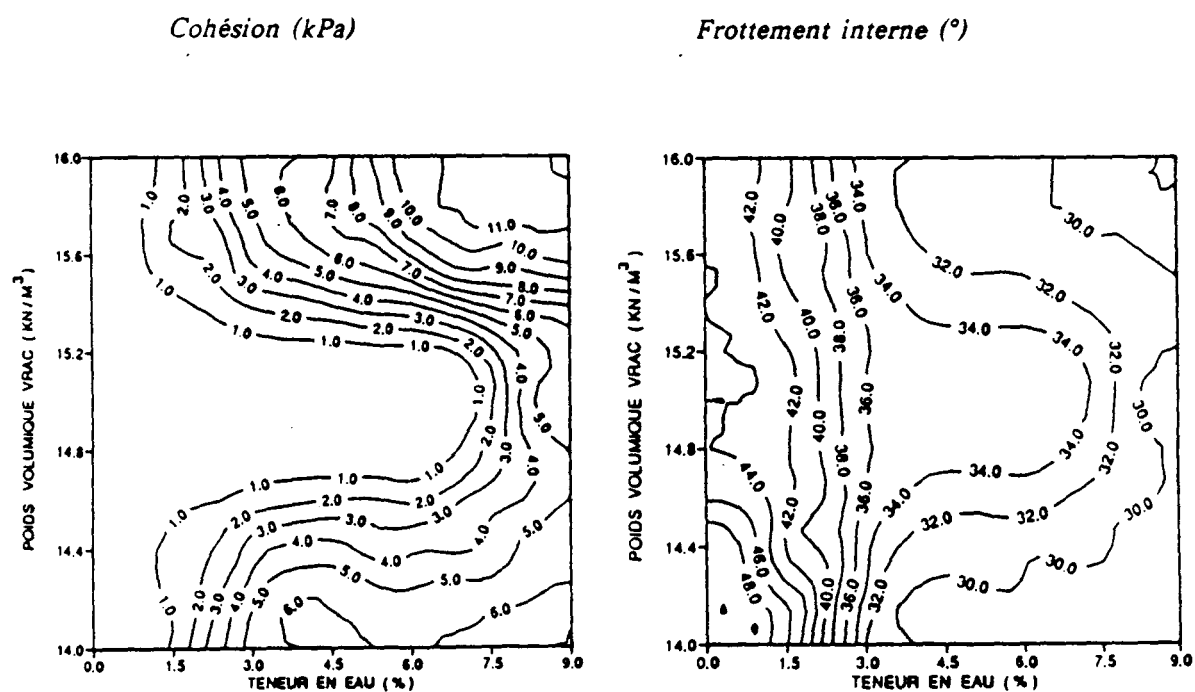
- haut à gauche : échantillons de forte densité vrac, sans cohésion et composés essentiellement du sable roulé de Loire.
- haut à droite : échantillons de forte densité vrac, présentant une cohésion apparente et composés essentiellement du sable broyé de Loire.

La différence des comportements au cisaillement des deux matériaux apparaît donc sur la partie haute de la figure c'est-à-dire à fort degré de consolidation. C'est sans doute à ce stade que la densité vrac joue un rôle important sur l'écoulement. La cohésion apparente peut exister à faible, moyenne et forte densité vrac. La teneur en eau favorise sa valeur au détriment de celle de l'angle de frottement interne. Les figures 3.11.a.b montrent comment la cohésion apparente et l'angle de frottement interne varient avec la teneur en eau et le poids volumique vrac. Les iso-cohésions pour le sable roulé de Loire s'annulent lorsque le poids volumique vrac de l'échantillon s'élève à 16 kN/m^3 . Apparemment les échantillons augmentaient de volume pendant le cisaillement à cette densité. Ceci montre une fois de plus la résistance du sable roulé de Loire au compactage. Ce matériau occasionnait, en effet, des résultats inexploitable pour les essais à la PCG. Les iso-cohésions pour le sable broyé de Loire montrent qu'à poids volumique voisin de 15 kN/m^3 , ce matériau ne développe de la cohésion qu'à teneur en eau élevée. Cela mérite d'être confirmé ultérieurement.

Figure 3.11 - Courbes iso-cohéSION apparente et iso-frottement



a) sable roulé de Loire



b) sable broyé de Loire

3.3.3 - SYNTHESE

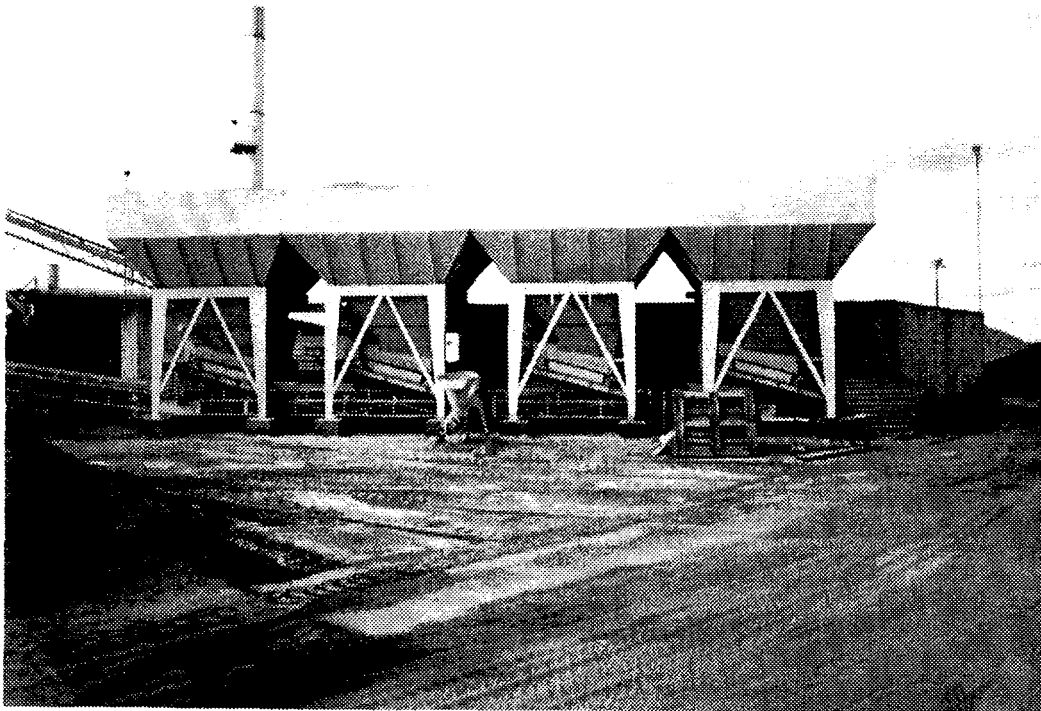
L'analyse des différents résultats qui vient d'être effectuée comporte deux parties.

La première partie porte sur les caractéristiques physico-géométriques des matériaux sans les propriétés de cisaillement. Elle a permis de dégager les paramètres susceptibles de faire apparaître les différences de comportement que ces matériaux exhibent pendant les essais d'écoulement. Le sable roulé de Loire, à écoulement facile, se distingue des trois autres sables (broyés avec fines) par sa propreté et sa faible aptitude au compactage. Ces deux derniers paramètres en revanche ne peuvent pas induire de différences nettes entre les sables broyés avec fines. En effet, il existe entre ceux-ci de fortes corrélations vis-à-vis des paramètres de compactage. Pourtant ils ne se comportent pas de la même manière à l'écoulement. Les paramètres susceptibles de faire apparaître leurs différences sont : la taille maximale des grains, la teneur en eau, la teneur en fines, l'indice de vide, la surface spécifique et le temps d'écoulement à l'angulomètre en prenant celui-ci comme caractéristique intégrant l'état de surface, la forme et l'angularité.

La seconde partie devrait être l'étude des paramètres sélectionnés ci-dessus combinés avec les propriétés de cisaillement pour savoir leur influence sur l'écoulement. Cela nécessite une quantité importante d'essais. Nous avons seulement pu réaliser quelques essais avec le sable roulé de Loire (écoulement facile) et le sable broyé de Loire (écoulement difficile) en s'intéressant tout particulièrement à la teneur en eau et au poids volumique vrac du matériau. Ce dernier paramètre, non étudié dans la première partie informe sur l'état de compactage (ou de consolidation) du matériau. L'analyse montre que la teneur en eau favorise la formation de cohésion apparente dans les grains et diminue l'angle de frottement interne. La cohésion peut se manifester à différents degrés de consolidation, du moins pour le sable broyé de Loire. En effet les deux sables diffèrent surtout à forte consolidation : si le sable roulé ne tasse plus, le sable broyé continue à se compacter et à gagner de la cohésion. Ceci reflète le comportement à l'écoulement de ces deux matériaux et souligne l'importance des paramètres teneur en eau (en liaison avec la teneur en fines) et masse volumique vrac. La confirmation de ce résultat est nécessaire avec d'autres matériaux. Il faudrait améliorer les conditions d'essais de cisaillement pour qu'ils se déroulent dans les conditions réelles de sollicitation dans la trémie. Il convient aussi d'essayer les essais de compression uniaxiale.

CHAPITRE 4

EXPERIMENTATIONS SUR MODELES REELS



Cette étude expérimentale consiste à déterminer le mécanisme de l'écoulement des matériaux granulaires dans les trémies de dosage. Les essais se déroulent dans les conditions réelles de chantier avec des matériaux à écoulements facile et difficile. Il s'agit donc de caractériser un phénomène à trois dimensions. Une étude préalable [74] montre la faisabilité de la méthode du marquage par traceur radioactif que nous allons poursuivre dans ce travail. L'exploitation des résultats de mesure conduit à la schématisation des lignes de rupture qui permettent de comprendre le mode d'écoulement en cheminée pour différentes formes de trémies et différents matériaux. Par ailleurs l'enregistrement des valeurs de la densité de matériau à la base de la trémie pendant l'écoulement constitue un élément d'interprétation complémentaire.

Les essais ont pu être effectués grâce aux collaborations de l'équipe du banc d'essai des doseurs à granulats à la S.E.M.R. de Blois et de l'équipe "traceurs" du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Angers.

4.1 - INSTALLATIONS ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

4.1.1 - BANC D'ESSAI DES DOSEURS A GRANULATS

Le banc d'essai des doseurs à granulats de la S.E.M.R. (Station d'Essai des Matériels Routiers) de Blois, où se déroulent les expérimentations, comprend un double circuit de matériau (figure 4.1) :

- l'un dit de "brassage" constitue le circuit principal et permet en plus d'homogénéiser le débit du doseur, la teneur en eau du matériau et son activité après avoir fait un marquage par traceur radioactif. Il comprend le doseur, la sauterelle de brassage, la trémie tampon et la sauterelle de retour.
- l'autre dit de "pesée" permet de déterminer le débit de matériaux et de le changer éventuellement en agissant sur la vitesse du tapis doseur.

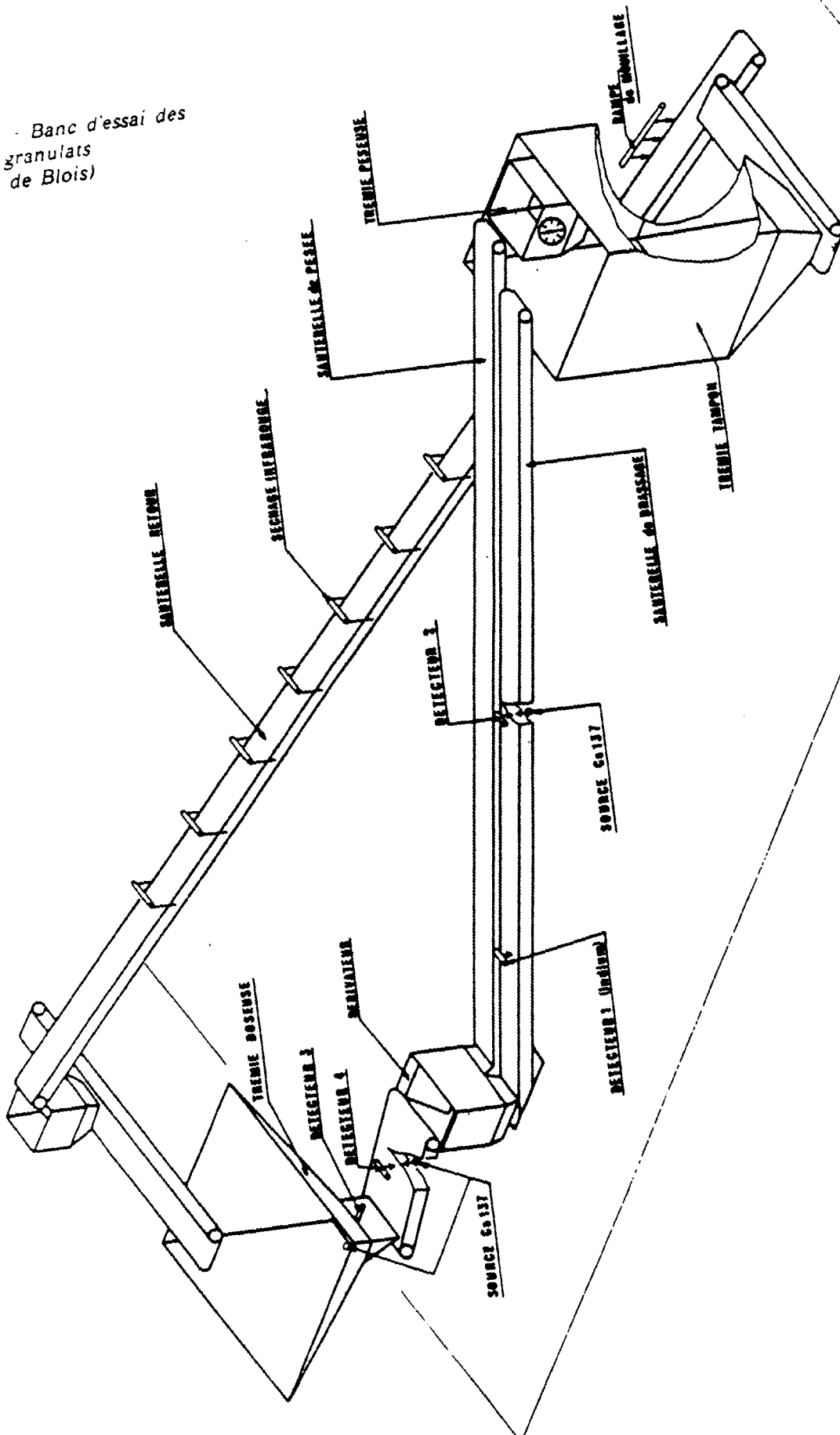
4.1.2 - IMPLANTATION DES DETECTEURS

La figure 4.1 montre l'implantation sur le circuit de brassage de 4 détecteurs à scintillation dont un détail sur le principe de fonctionnement se trouve à l'annexe D.1.

4.1.2.1 - DETECTEUR D'INDIUM 113 : DETECTEUR 1

Ce détecteur, installé au début de la bande transporteuse et branché à la voie 1 de mesure, enregistre lors de la vidange l'activité (cf annexe D.1) dans le matériau. Il est réglé de façon à capter les photons de 392 Kev émis par l'Indium 113 contenu dans le traceur radioactif (cf 4.2.1.1). Ainsi l'enregistrement représente la répartition du traceur à la sortie de la trémie pendant la vidange d'où l'appellation "signal traceur" ou "signal indium" dans la suite.

Figure 4.1 - Banc d'essai des
doseurs à granulats
(S.E.M.R. de Blois)



4.1.2.2 - DETECTEURS D'ÉPAISSEUR ET DE DENSITÉ DE MATÉRIAU

Le détecteur est placé face à une source de césium 137, de période 33 ans, qui émet des photons γ de 662 Kev [72, 73]. Il enregistre la quantité " ρx " du matériau (ρ étant sa masse volumique et x son épaisseur). L'enregistrement traduit donc une évolution de densité (resp d'épaisseur) lorsque x est constante (resp ρ est constante).

- Détecteur 2 :

Installé sur la bande transporteuse et branché à la voie 2 de mesure, il enregistre l'évolution de l'épaisseur de veine de matériau en admettant que ρ est constante.

- Détecteur 3 :

Son enregistrement, obtenu à la voie 3 de mesure, représente l'évolution de la densité du matériau à la base de la trémie car x y est constante.

- Détecteur 4 :

Connecté à la voie 4 de mesure et placé sur le tapis doseur il fonctionne comme le détecteur 2 et son enregistrement sert à repérer le début et la fin de la vidange.

4.1.3 - DISPOSITIF DE MARQUAGE

Il comprend :

- une enceinte en plomb qui renferme le traceur radioactif,
- une armoire électrique de commande qui permet, grâce à un système de pressurisation, d'envoyer le produit marqueur par un tuyau en rilsan qui aboutit sur une buse de répandage,
- une rampe de marquage (figure 4.2 et photo 4.1)) montée sur roues en haut de la trémie et constituée de deux tubes métalliques à section rectangulaire sur lesquelles se déplace l'engin marqueur à moteur.

Ce dernier entraîne la buse de répandage et est mobile entre une butée de démarrage et une butée d'arrêt réglables suivant le niveau à marquer. Ce système permet d'avoir un jet de traceur vertical et de marquer suivant le sens de l'écoulement et le sens perpendiculaire.

4.2 - METHODE DE MESURE

Les quatre détecteurs à scintillation installés sur le banc d'essai jouent le même rôle, à savoir la détection du rayonnement γ dont la technique fait l'objet de l'annexe D.1. Seulement les photons γ peuvent provenir soit du matériau marqué au traceur radioactif, soit d'une source de césium pour la détermination de l'épaisseur équivalente de matériau.

4.2.1 - MARQUAGE PAR TRACEUR RADIOACTIF

Le marquage consiste à répandre un produit radioactif sur une bande horizontale de matériau de 15 cm environ de largeur dans la trémie (figure 4.3.a) puis à enregistrer la répartition du traceur sur une bande transporteuse située à l'aval de celle-ci pendant la vidange.

4.2.1.1 - LE TRACEUR RADIOACTIF

L'Indium 113 constitue le radioélément marqueur. Il assure une facilité de mise en oeuvre à cause de ses propriétés chimiques favorables. De période de 99,4 min, il offre une sécurité meilleure et se classe parmi les éléments de radiotoxicité la plus faible. Sa production se fait sur le lieu d'utilisation à l'aide de générateur d'étain 113-indium 113 m. Dans ce générateur, qui contient des résines échangeuses d'ions, l'étain 113 se désintègre pour donner naissance à l'indium 113 m. Ce dernier sera extrait sous forme de chlorure d'indium en faisant percoler une solution éluante d'acide chlorhydrique 0,05 N sur les résines qui fixent par contre l'étain. L'indium 113m obtenu mélangé avec de l'eau et de la bentonite constitue le traceur radioactif.

4.2.1.2 - MODE DE MARQUAGE

Des essais préliminaires, réalisés dans le cadre d'un travail de D.E.A. [74] ont permis de prouver la faisabilité du marquage par traceur radioactif et de définir le mode de marquage.

- Marquage niveau par niveau

Pour tous les marquages, quel que soit le niveau, la trémie doit être chargée au niveau plein avant de procéder à la vidange (figure 4.3.a,b).

Il a été constaté à l'aide d'essais préliminaires [74] que la courbe du signal indium obtenu en marquant deux niveaux différents représente les mêmes phénomènes que la courbe résultante lorsqu'on marque séparément les deux niveaux et qu'on superpose les résultats. Ainsi les marquages sont effectués séparément niveau par niveau pour une raison de commodité dans le dépouillement puis la combinaison des résultats permet de reconstituer le mode d'écoulement.

Figure 4.2 - Rampe de marquage

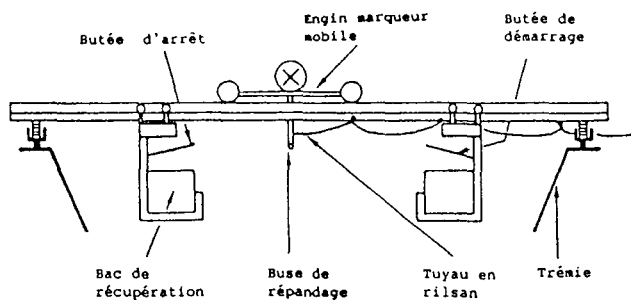


Photo 4.1 - Rampe de marquage

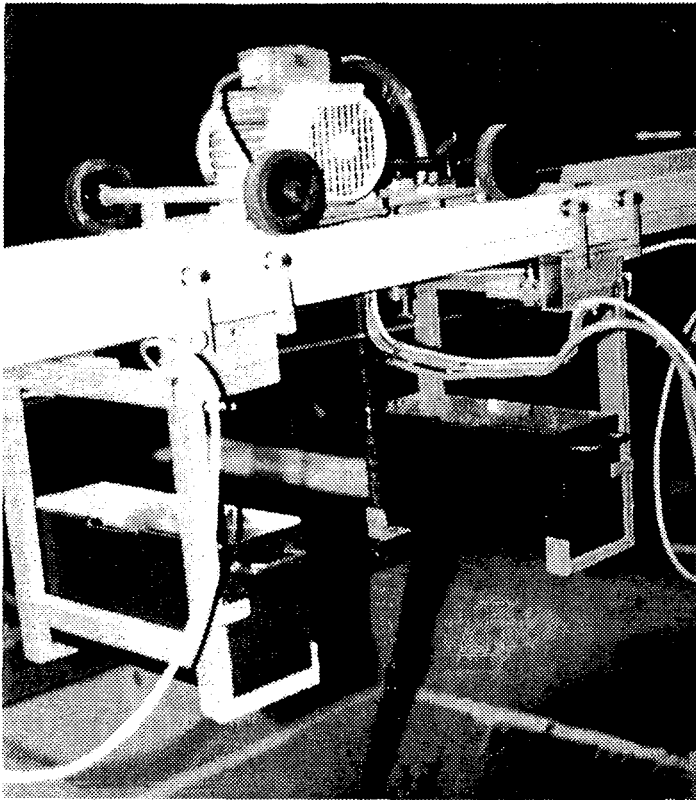
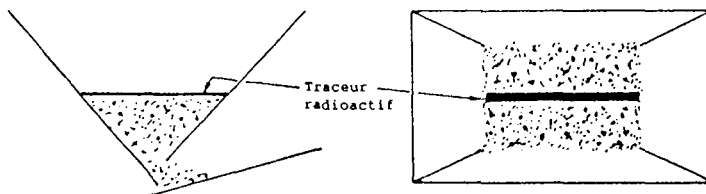
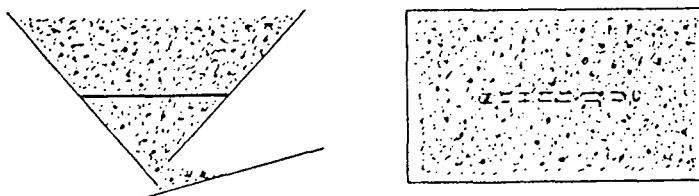


Figure 4.3 - Mode de marquage

a) Mise en place du traceur



b) remplissage après le marquage



- Marquage localisé ou "demi-marquage"

. Pour une trémie symétrique et un écoulement (en cheminée) symétrique il existe deux possibilités: soit de marquer une ligne complète par niveau (figure 4.5.b) soit de marquer la moitié de chaque niveau (figure 4.6.c). autrement dit il y a choix entre l'étude d'une trémie entière et celle d'une moitié de trémie.

. Pour une trémie dissymétrique (figure 4.5.b) il faut étudier deux compartiments séparés par une ligne imaginaire choisie de façon à être dans la cheminée initiale lors de la vidange. Comme le départ de matériau sur un niveau dans chacun des compartiments s'effectue depuis la ligne imaginaire vers les parois, il devient possible de les étudier séparément en réalisant des demi-marquages. La faisabilité de ces derniers a été vérifiée en comparant le signal $C_1(t)$ (fig. 4.4) obtenu avec le marquage d'une ligne complète et le signal $C_0(t)$ résultant de la superposition des deux signaux obtenus avec les deux marquages effectués de part et d'autre de la ligne imaginaire.

Le calcul de la superposition a été mené en admettant l'existence d'une proportionnalité entre la quantité de traceur évacuée à un instant t et la longueur que celle-ci occupait sur la ligne de marquage.

Dans l'exemple illustré par la figure 4.4 les deux signaux $C_0(t)$ et $C_1(t)$ obtenus décrivent le même processus d'évacuation de la tranche marquée pendant l'écoulement. Ce processus comprend 3 étapes composées d'une formation de cheminée (1^{er} bloc de traceur) suivie de deux ruptures (les deux derniers blocs de traceur) autour de celle-ci. Le début et la fin de chaque étape sont pratiquement respectés pour les deux cas de figures (en les superposant). Il en est de même pour la quantité de matériau évacuée à la fin de chaque étape. Ainsi le décalage du pic de traceur observé à l'intérieur d'une étape (comme le cas de la seconde étape du signal $C_0(t)$ (fig 4.4.b)) n'apporte pas de modification sur le schéma des lignes de rupture dont la technique de tracé est développée plus loin (Cf. 4.4).

- Marquages longitudinal et transversal

L'écoulement étant à trois dimensions, il convient d'effectuer des marquages suivant le sens de l'écoulement que nous appellerons "marquages longitudinaux" et des marquages suivant le sens perpendiculaire à l'écoulement que nous appellerons "marquages transversaux".

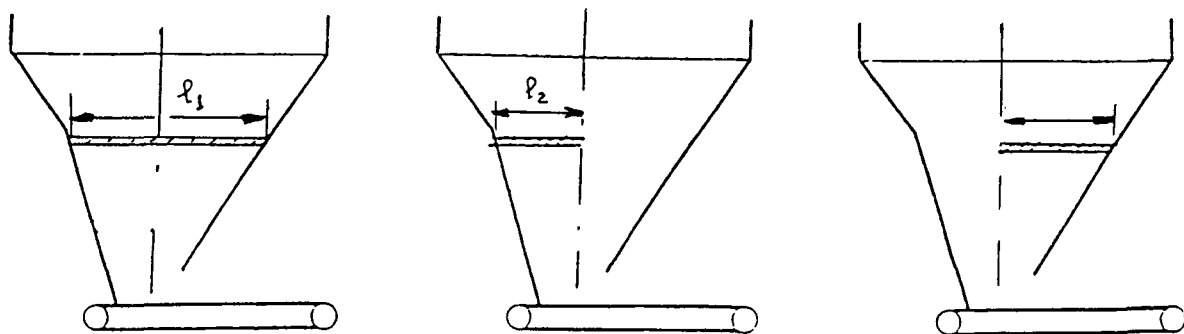
4.2.2 - MESURE DE L'ÉPAISSEUR ET DE LA DENSITÉ DU MATÉRIAU

La mesure met à profit le phénomène d'atténuation du rayonnement γ dans la matière (Cf annexe D.1.2). Une source de césium 137, placée en face du détecteur constitue l'émetteur de photons γ à travers le matériau. La détermination de l'épaisseur équivalente de matériau est explicitée dans l'annexe D.1.2.2. L'enregistrement fourni par le détecteur peut exprimer soit une évolution de densité soit une évolution de l'épaisseur de matériau conformément à l'explication donnée au 4.1.2.2.

4.2.3 - ACQUISITION DES DONNEES

L'acquisition des données à l'aide d'un micro-ordinateur APPLE II.e commence 15 secondes environ avant le démarrage de la vidange. On effectue deux prises de mesure par seconde simultanément sur les quatre voies jusqu'à ce que les enregistrements indiquent la fin de la vidange.

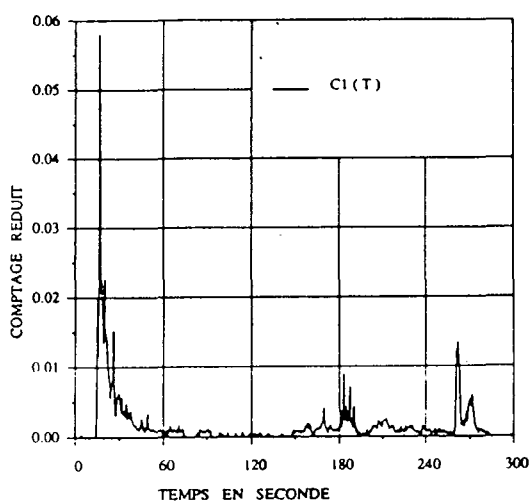
Figure 4.4 - Vérification de la faisabilité du demi-marquage



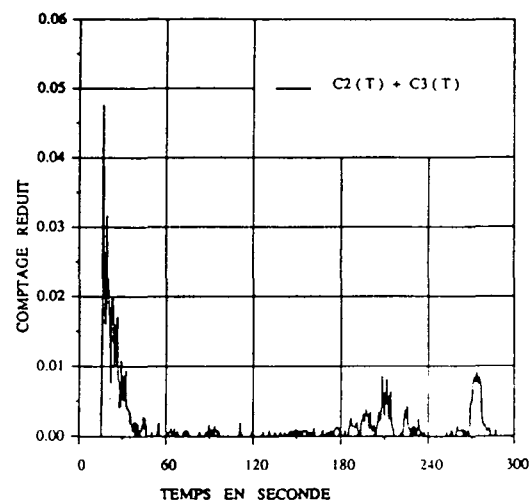
Marquage complet
Comptage normé $C_1(t)$
(essai n° 14, tableau d.2)
(annexe D)

Demi-marquage arrière
Comptage normé $C_2(t)$
(essai n° 10 tableau d.2)
(annexe D)

Demi-marquage avant
Comptage normé $C_3(t)$
(essai n° 11 tableau d.2)
(annexe D)



a) Signal $C_1(t)$



b) Superposition des signaux

$C_2(t)$ et $C_3(t)$

$$C_0(t) = C_2(t) l_2/l_1 + C_3(t) l_3/l_1$$

4.3 - ESSAIS REALISES

4.3.1 - MATERIAUX

- Les essais concernent principalement les quatre matériaux cités ci-après à raison de deux valeurs de la teneur en eau par matériau conformément au critère de choix explicité dans 3.1 :

- . sable roulé de Loire 0/4
- . sable broyé de Loire 0/2 à environ 20 % de fines
- . sable broyé calcaire Tripleville 0/2 à environ 15 % de fines
- . cendres volantes de Vitry-sur-Seine.

- Seul le sable roulé de Loire s'écoule facilement tandis que les autres matériaux, surtout à teneur en eau élevée (Cf 3.1), présentent parfois des problèmes d'écoulement et dans ce cas nous fonctionnons systématiquement avec vibreur durant la vidange pour éviter les irrégularités voire les interruptions dans le déroulement de l'essai.

- La quantité importante d'essais à réaliser nécessite une grande quantité de matériau si bien qu'il a fallu garder le même matériau pour quelques essais. Pour cela nous avons :

- . soit homogénéisé le matériau après chaque essai afin de bien répartir l'activité issue du traceur radioactif en procédant par remplissages successifs et alternés entre le doseur et la trémie tampon. L'enregistrement du détecteur 1 (d'indium) permet de tester l'homogénéité suivant le procédé donné à l'annexe D.1.3.3.
- . soit alterné les matériaux pour que l'activité décroisse suffisamment pendant le stockage. On évite ainsi le risque de formation de boulettes (cendres volantes) pendant l'homogénéisation.

4.3.2 - TREMIES

Les deux grands types de trémies, à extraction et à écoulement naturel, ont été utilisés.

La trémie à extraction, d'une contenance environ 10 m^3 , est de forme dissymétrique suivant le sens de l'écoulement mais symétrique dans le sens perpendiculaire (figure 4.5 et photo 4.2). Ainsi nous faisons des "demi-marquages" dans le sens longitudinal (figure 4.5.b) et des marquages complets dans le sens transversal (figure 4.5.c). D'après les figures 4.5.b et c, on effectue 9 essais (9 marquages) par teneur en eau, soit 18 essais par matériau. A cause de la dissymétrie manifeste de l'écoulement des cendres volantes causée par le vibreur (fig 4.5.c) les essais en mode transversal n'ont pas été effectués avec ce matériau. Pour toutes les expérimentations la trémie fonctionne en volumétrique (cf 1.1.2.2) avec un débit de 120 t/h. Le tableau d.1 de l'annexe D.2 résume les différents essais effectués.

figure 4.5 - Configuration de la trémie à extraction

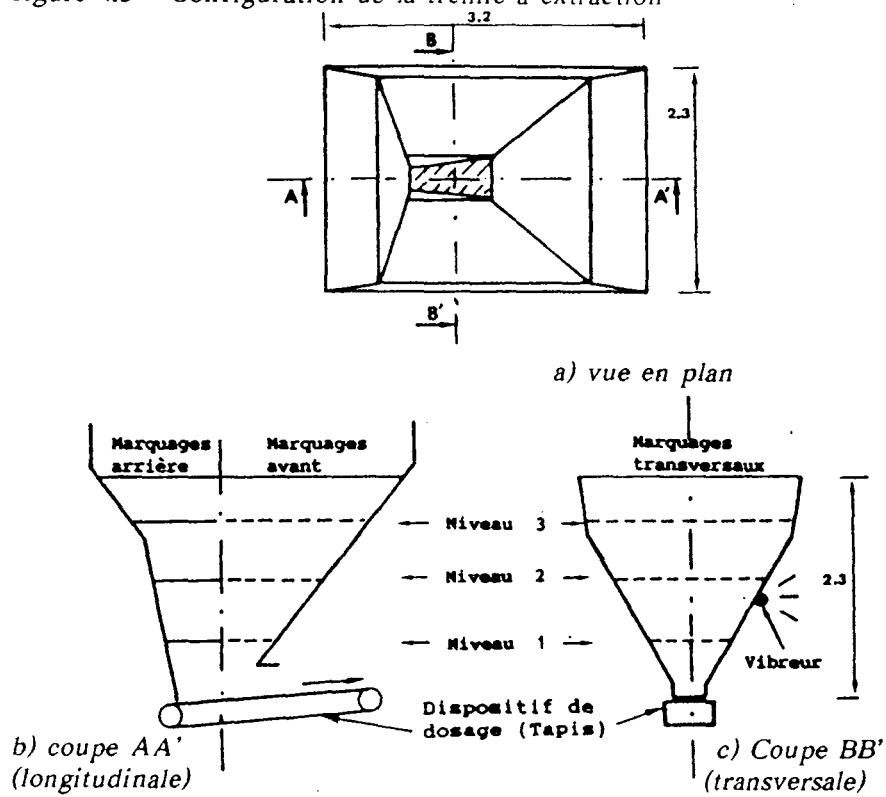
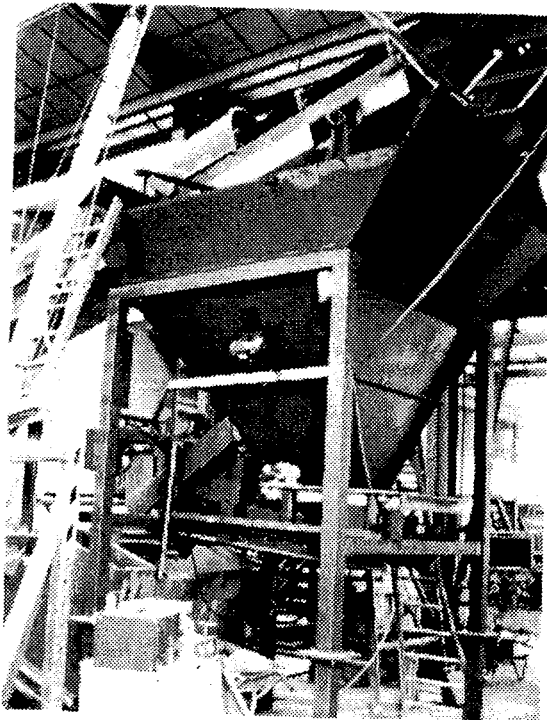


Photo 4.2 - Trémie à extraction



La trémie à écoulement représentée par la figure 4.6 est une trémie d'une contenance environ 10 m³ et de forme symétrique. Malgré la symétrie de la coupe longitudinale, le fait d'évacuer le matériau du côté avant peut engendrer une dissymétrie ainsi nous pratiquons des "demi-marquages" sur deux compartiments avant et arrière (figure 4.6.b). Dans le sens transversal nous procédons également au demi-marquage mais avec un seul compartiment à cause de la symétrie (figure 4.6.c). Comme le cas de la trémie à extraction on effectue donc 9 essais par teneur en eau soit 18 essais par matériau. Le tableau d.2 de l'annexe D.2 résume les essais effectués auxquels s'ajoutent deux essais tests avec du sable broyé calcaire de Tripleville 0/6 à environ 10 % de fines. De plus quelques essais, présentés dans le tableau d.3 de l'annexe D.2, ont été réalisés avec la trémie équipée d'un dispositif anti-voûte appelé "VE de décharge" (figure 4.7).

4.4 - METHODES D'EXPLOITATION DES MESURES

Les enregistrements obtenus à la suite de la manipulation constituent des données brutes ainsi, pour qu'ils puissent être exploitables, il faut effectuer une série de calculs préliminaires, en particulier les corrections des temps morts des électroniques, des bruits de fond et de la décroissance radioactive. La méthode d'exploitation des données proprement dites, dont nous donnons ci-après une description plus ou moins détaillée, a fait l'objet d'un travail de D.E.A. [74] qui précédait cette thèse.

4.4.1 - TRAITEMENT DU SIGNAL INDIUM-REPRESENTATION DES LIGNES DE RUPTURE

4.4.1.1 - DESCRIPTION DU SIGNAL INDIUM

Rappelons que le terme "signal indium" ou "signal traceur" désigne l'enregistrement obtenu avec le détecteur 1 (figure 4.1) pendant l'écoulement. Généralement la représentation graphique de ce signal montre une succession de pics plus ou moins importants (figure 4.4.a) indiquant que le traceur part par bloc lors de la vidange. La formation initiale de la cheminée, se traduit par un pic important au début de la courbe du signal. Ensuite la courbe évolue différemment suivant le niveau marqué :

- pour les marquages hauts elle montre généralement que le traceur s'éboule progressivement dans la cheminée,
- pour les marquages bas elle montre généralement une phase de rétention d'une partie du matériau situé au voisinage des parois et qui ne part qu'en fin de vidange. Cette phase correspond à l'écoulement à travers la cheminée du matériau situé au-dessus du niveau marqué.

figure 4.6 - Configuration de la trémie à écoulement
(cotes en mètre)

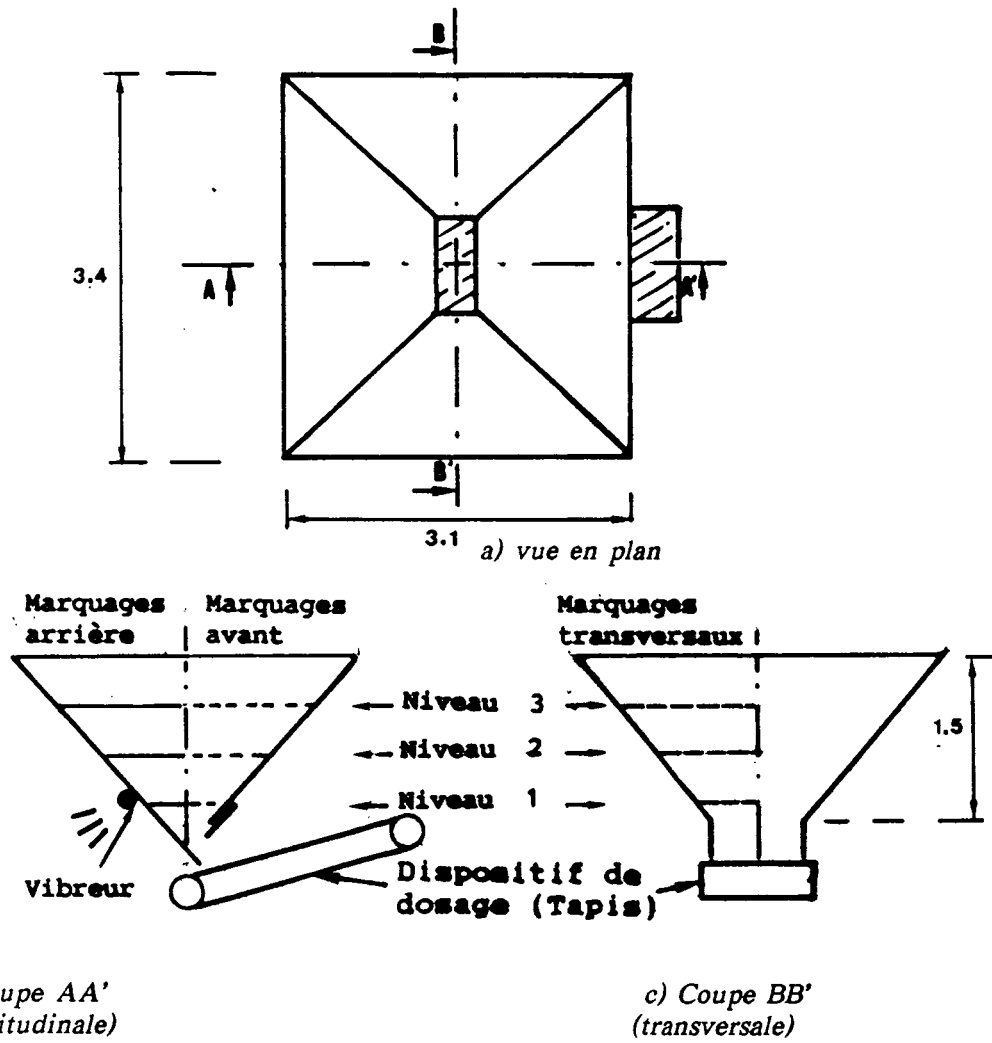
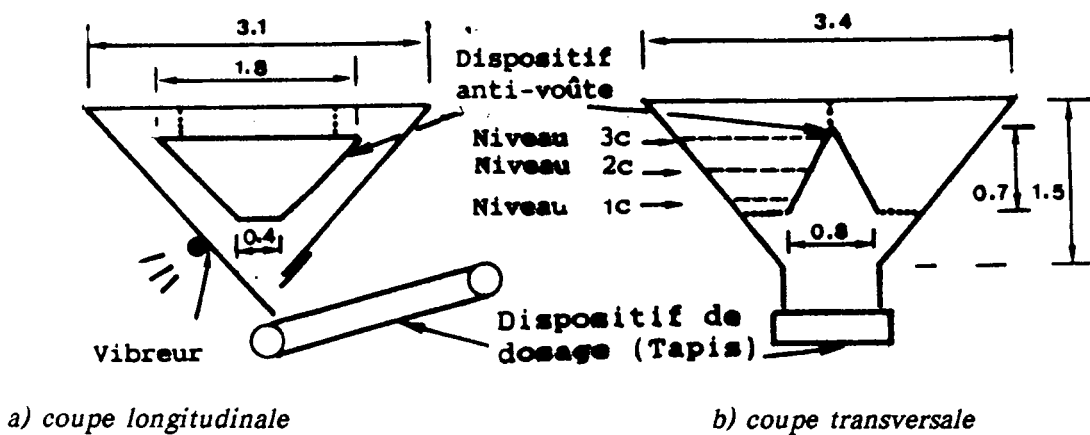


Figure 4.7 - La trémie à écoulement avec un VE de décharge



4.4.1.2 - MODELISATION DU SIGNAL INDIUM

- Approche du signal en écoulement parfait

Supposons que le marquage, qui représente une tranche infinitésimale de matériau, s'écoule parfaitement en masse. Dans ce cas le comptage $c(t)$ enregistré par le détecteur reste constant pendant l'écoulement dont la durée est notée T

$c(t) = c = \text{constante pour } t \in [0, T]$.

L'expression $Q(t)$ des comptages cumulés s'obtient en discrétisant l'intervalle $[0, T]$ en N intervalles de longueur T_e . T_e correspond à la durée de chaque prise de mesure et N au nombre de mesures.

Si t vaut $t = nT_e$ alors :

$$Q(t) = Q(nt_e) = \sum_{k=1}^n c(kT_e) = nc = (c/T_e)t \quad (4.1)$$

$Q(t)$ est alors un segment de droite.

- Approche du signal en écoulement de cheminée

La description du signal indium en écoulement de cheminée faite au 4.4.1.1 montre que le matériau appartenant à une tranche marquée part par bloc pendant l'écoulement. Il s'agit maintenant de déterminer ces blocs. Pour cela on suppose que chaque bloc s'écoule parfaitement et suit l'approche établie ci-dessus. La courbe du signal $c(t)$ est alors constante par morceau et par conséquent la courbe des comptages cumulés $Q(t)$ se compose de segments de droite c'est-à-dire de zones de pente constante (ou zones de pente homogène).

4.4.1.3 - EVOLUTION DE LA LIGNE MARQUEE PENDANT L'ECOULEMENT

Le problème revient maintenant à appliquer l'approche faite ci-dessus pour un écoulement en cheminée aux signaux indium obtenus au cours des expérimentations. Autrement dit il faut pouvoir délimiter sur la tranche marquée les différents blocs dans l'ordre de leur départ durant la vidange. Il convient pour cela de travailler avec les courbes des comptages cumulés $Q(t)$ qui comportent nettement moins de fluctuations (cf figure 4.9) que les signaux indium $c(t)$ (cf figure 4.4) et qui permettent ainsi de mieux distinguer chaque zone associée à un bloc. Pour une raison de commodité il convient également de normer chaque comptage en le divisant par la somme des comptages obtenus pour toute la vidange.

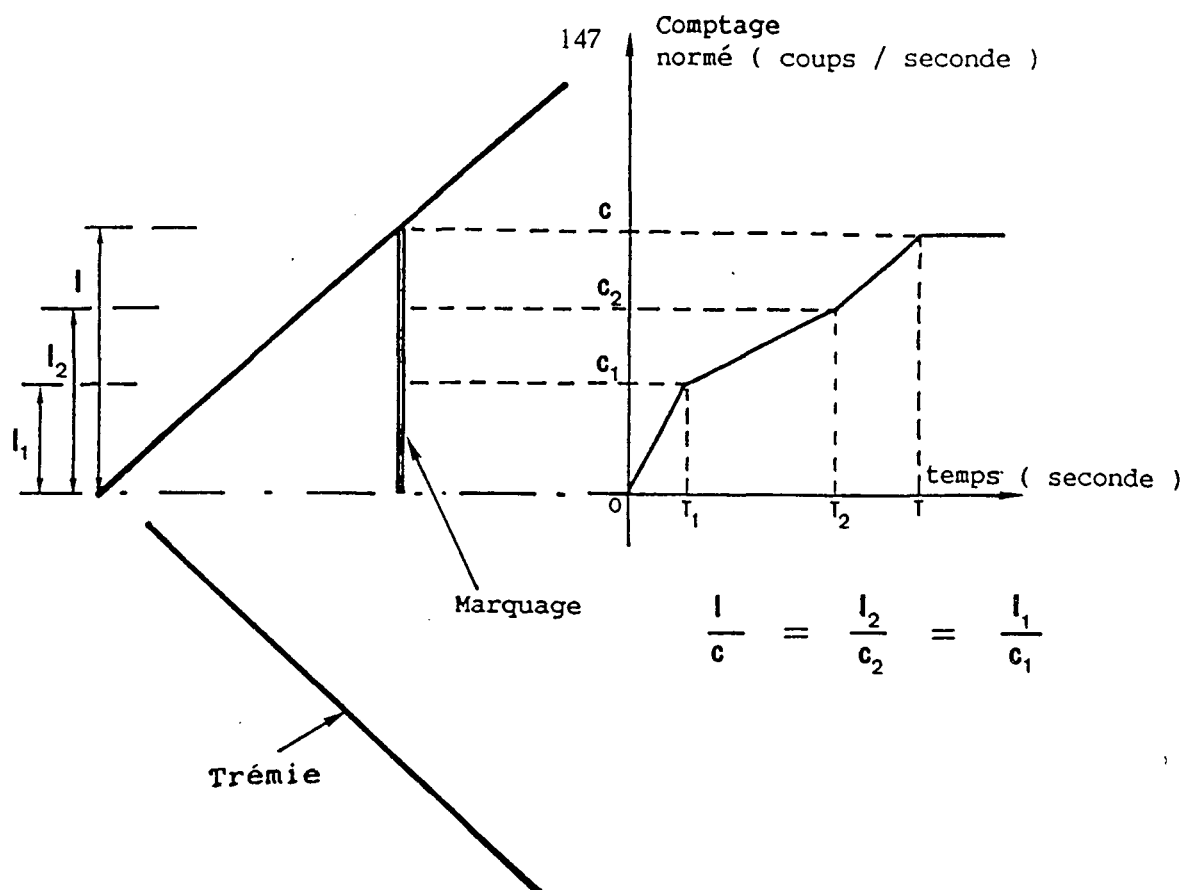


Figure 4.8 - Repérage des blocs sur la ligne de marquage

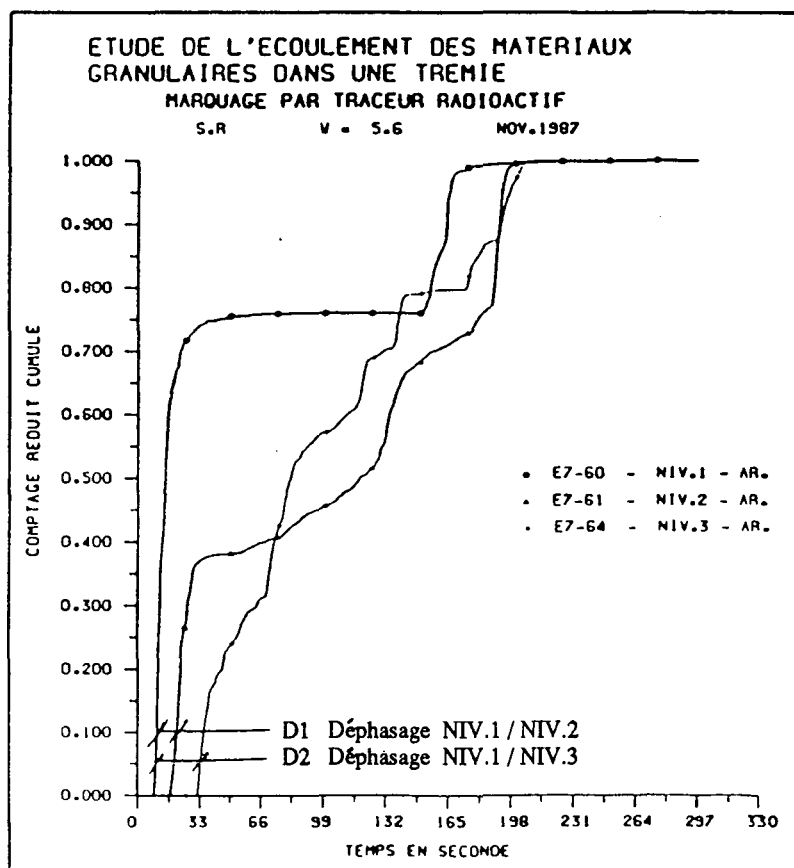


Figure 4.9 - Déphase entre les niveaux de marquage au passage devant le détecteur

Le programme établi pour le repérage des blocs demande au départ l'introduction des valeurs approximatives des bornes entre les zones après examen visuel de la courbe des comptages réduits cumulés. Ensuite il fait le lissage en segment de droite, par moindres carrés, de chaque zone suivi du calcul de l'indice de corrélation entre les points de la courbe et ceux de la droite de lissage. Les intersections des segments de droite obtenus constituent les nouvelles bornes. On recommence l'opération avec ces dernières et ainsi de suite jusqu'à l'obtention des bornes définitives qui correspondent aux meilleures valeurs des indices de corrélation. Enfin il suffit d'effectuer une projection telle que la montre la figure 4.8 pour avoir la répartition des blocs sur la ligne marquée et ce dans l'ordre de leur départ. Cette projection introduit une proportionnalité entre la quantité de traceur évacuée à un instant t et la longueur que celle-ci occupait auparavant sur la ligne de marquage.

4.4.1.4 - SCHEMATISATION DES LIGNES DE RUPTURE

Sachant reconstituer l'ordre de départ des blocs pour les différents niveaux marqués dans la trémie, on relie deux niveaux voisins par des lignes délimitant les blocs qui s'écoulent simultanément dans la cheminée.

Avec trois lignes de marquage (donc trois niveaux) de longueur respective l_1 , l_2 et l_3 le programme de tracé se déroule de la façon suivante :

1 - Calcul des comptages normés réduits ($Q_1(t)$, $Q_2(t)$ et $Q_3(t)$) correspondant aux trois marquages (fig 4.9) et changement du repère temps à l'instant où le premier traceur passe devant le détecteur. Cela revient à éliminer les déphasages D_1 et D_2 matérialisés sur la figure 4.9.

2 - Recherche et lissage des zones de pente homogène dans $Q_1(t)$, $Q_2(t)$ et $Q_3(t)$. Il en résulte des comptages lissés $q_1(t)$, $q_2(t)$ et $q_3(t)$ ainsi que les bornes délimitant les zones (abscisses des points de changement de pente).

3 - Détermination des bornes communes aux trois comptages. En fait les trois niveaux marqués ne subissent pas forcément le même nombre de ruptures donc ils n'ont pas le même nombre de bornes. On peut cependant relier la frontière d'un bloc sur un niveau à plusieurs d'un autre niveau lorsqu'il n'y a pas de rupture sur ce premier niveau. Cela revient à prendre pour les trois niveaux les mêmes bornes déterminées par la démarche suivante :

- rangement de toutes les bornes appartenant aux trois niveaux dans l'ordre croissant,
- remplacement des bornes suffisamment groupées par une seule (puisqu'elles correspondent à la même rupture) en utilisant le critère suivant : le matériau faisant partie de la même rupture met environ un temps D_2 (fig 4.9) pour passer devant le détecteur. On considère alors que les successions de rupture se font par séquence de durée D_2 . Dans ce cas les bornes groupées dans un intervalle de temps D_2 font partie de la même rupture.

Il reste à la fin les bornes communes notées $t_1, \dots, t_n$.

4 - Tracé des lignes de rupture en faisant les jonctions suivantes dans une représentation graphique de la trémie :

ligne 1 :

$$\begin{aligned}
 & [q_1(t_1) \frac{l_1}{2}, z_1] \rightarrow [q_2(t_1) \frac{l_2}{2}, z_2] \rightarrow [q_3(t_1) \frac{l_3}{2}, z_3] \\
 & \dots\dots\dots \\
 & [q_1(t_n) \frac{l_1}{2}, z_1] \rightarrow [q_2(t_n) \frac{l_2}{2}, z_2] \rightarrow [q_3(t_n) \frac{l_3}{2}, z_3]
 \end{aligned}$$

4.4.2 - TRAITEMENT DE L'ENREGISTREMENT DE LA DENSITE DE MATERIAU A LA BASE DE LA TREMIE

La méthode, mise au point par MM. PEYBERNARD et LEBAS [70], consiste à découper un enregistrement en des zones telles que dans chacune d'elles les valeurs se répartissent autour d'une moyenne et que la différence entre les valeurs moyennes de deux zones successives est significative.

4.4.2.1 - CRITERE D'HOMOGENEITE

Pour une suite de valeurs observées issues d'une population normale, le test des carrés moyens des différences successives permet de caractériser l'homogénéité. Lorsque le test montre que les valeurs constituant un enregistrement ne peuvent pas appartenir à une population normale avec un risque α de l'affirmer à tort, on procède au découpage.

4.4.2.2 - METHODE DE DECOUPAGE

Afin de procéder au découpage il faut déterminer les indices des points frontières entre les zones homogènes. Considérons alors un enregistrement qui contient n valeurs x_j de moyenne $\bar{x}$ et qui se compose de deux zones de point frontière i . Il a été montré [70] que l'indice de ce point frontière correspond au maximum de la fonction $g(i)$ telle que

$$g(i) = \frac{n}{i(n-i)} \left(\sum_{j=1}^i y_j \right)^2 \quad 1 \leq i \leq n-1 \quad (4.3)$$

avec $y_j = x_j - \bar{x}$

4.4.2.3 - ALGORITHME DE DECOUPAGE

- Etape 1 : Test d'homogénéité

Si le test est vérifié on arrête le traitement sinon on poursuit à l'étape 2.

- Etape 2 : Découpage en zones

Il s'agit de trouver le point frontière i des 2 zones tel que :

$$g(i) = \max \{ \{g(j) , 1 \leq j \leq n-1\} \}$$

- Etape 3 : Réitération

Toute zone qui ne vérifie pas le test d'homogénéité (étape 1) sera découpée à son tour (étape 2) et ainsi de suite jusqu'à l'obtention de toutes les zones homogènes.

4.5 - ANALYSE DES RESULTATS

4.5.1 - INTERPRETATION DES SCHEMAS DES LIGNES DE RUPTURE

Les figures 4.10 à 4.13 représentent les lignes de rupture dans les deux trémies étudiées en modes longitudinal et transversal pour les quatre matériaux testés. La méthode ne prétend pas reconstituer d'une façon rigoureuse les limites des ruptures mais elle montre comment celles-ci s'effectuent et évoluent pendant la vidange.

4.5.1.1 - MODE D'ECOULEMENT

Il ressort des différents schémas des lignes de rupture que les deux trémies étudiées n'entretiennent que des écoulements en cheminées avec les différents matériaux ayant servis aux essais. La vidange commence par la formation d'une cheminée à travers laquelle va ensuite s'écouler le produit situé sur son pourtour. Après l'élargissement de la cheminée le produit situé au voisinage de la paroi glisse vers la sortie (fig 4.12 à 4.13 et photo 4.3).

4.5.1.2 - INFLUENCE DE LA GEOMETRIE DE LA TREMIE

- Les lignes de glissement obtenues avec la trémie à extraction, dissymétrique dans le sens longitudinal (fig [4.10, 4.11, 4.12] - a et c, fig 4.13 a et b), mettent en évidence l'influence des inclinaisons des parois. La paroi arrière présente une pente plus forte que celle avant ; et justement il se forme globalement moins de rétention de matériau à l'arrière qu'à l'avant de cette trémie lorsque la cheminée se crée. Ainsi la partie arrière se vide plus vite que la partie avant.

- La taille de la cheminée initiale dépend de la plus grande dimension de l'ouverture à la base de la trémie. Ce résultat est mis en évidence par l'étude de la trémie à extraction en mode transversal

(fig [4.10, 4.11, 4.12] b et d) et par l'étude de la trémie à écoulement en mode longitudinal (fig [4.10, 4.11, 4.12] e et g)

Au fond de la trémie, le matériau doit s'évacuer vers l'avant (donc sur un côté). Ceci provoque une certaine dissymétrie de l'écoulement, mise en évidence à partir des schémas de rupture dans la trémie à écoulement en mode longitudinal. Le vibreur installé sur la paroi arrière de cette trémie accentue aussi sans doute cette dissymétrie. Il fonctionnait sans interruption pendant les essais avec le sable broyé de Loire, le sable broyé calcaire 0/2 à teneur en eau élevée et les cendres volantes.

Les schémas montrent que globalement il se produit plus de ruptures dans la trémie à écoulement que dans la trémie à extraction. Cela laisse supposer un écoulement plus difficile avec cette première trémie.

4.5.1.3 - INFLUENCE DES PROPRIETES D'ECOULEMENT DU MATERIAU

La taille de la cheminée initiale dépend aussi de la difficulté d'écoulement du matériau. Le sable roulé de Loire (fig 4.10) forme les plus grandes cheminées initiales, ensuite viennent le sable broyé de Loire et le sable broyé calcaire 0/2 (fig 4.11 et 4.12) et enfin les cendres volantes. D'ailleurs ce dernier a plutôt tendance à former une voûte (dynamique) avant la création de la cheminée. Ce phénomène est mis en évidence avec la trémie à extraction par l'absence de rétention de matériau à la base arrière et avec la trémie à écoulement par l'absence presque de la cheminée initiale (fig 4.13).

Photo 4.3 - Ecoulement en cheminée



Figure 4.10 - Lignes de rupture avec le sable roulé de Loire

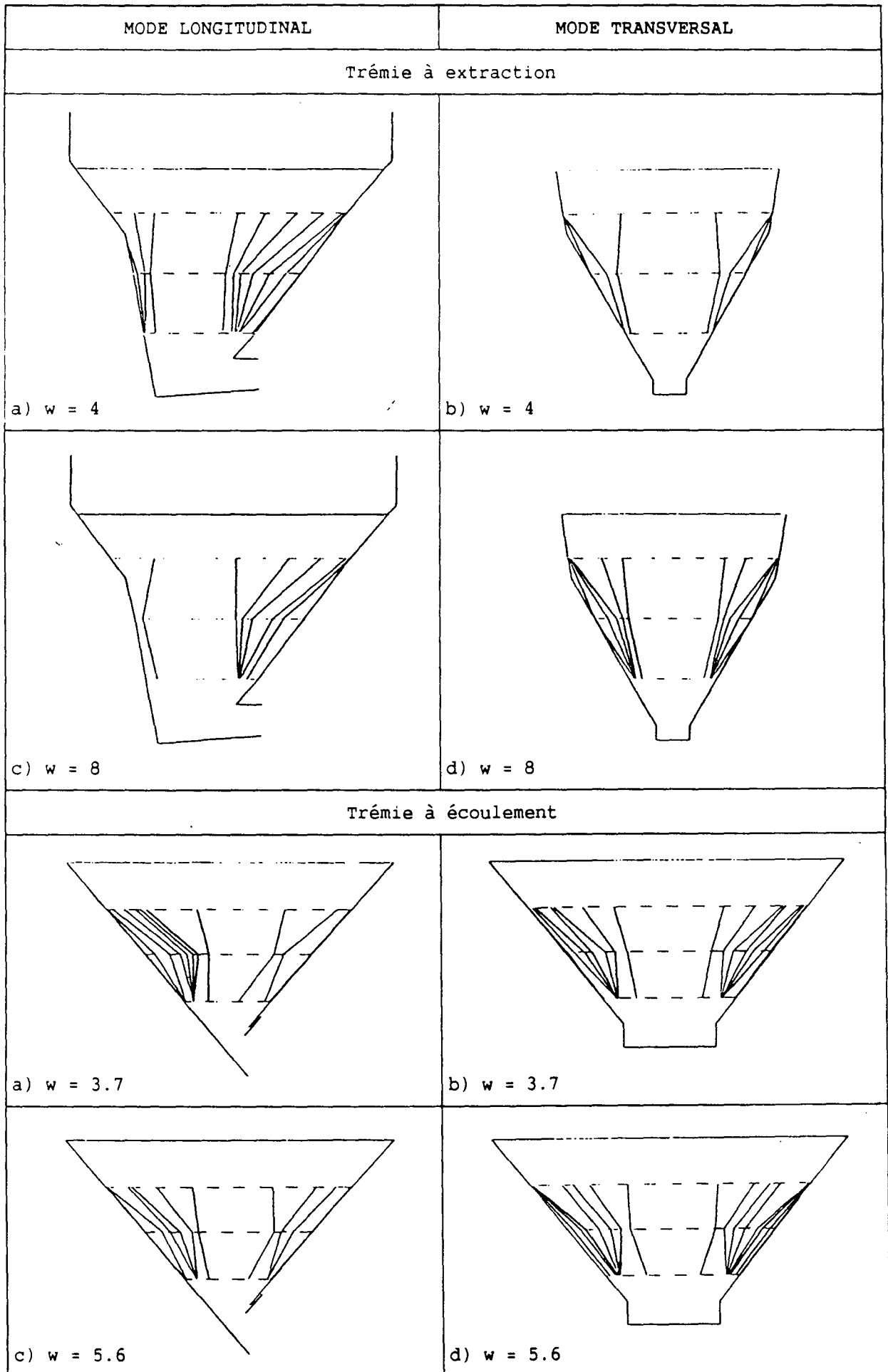


Figure 4.11 - Lignes de rupture avec le sable broyé de Loire 0/2

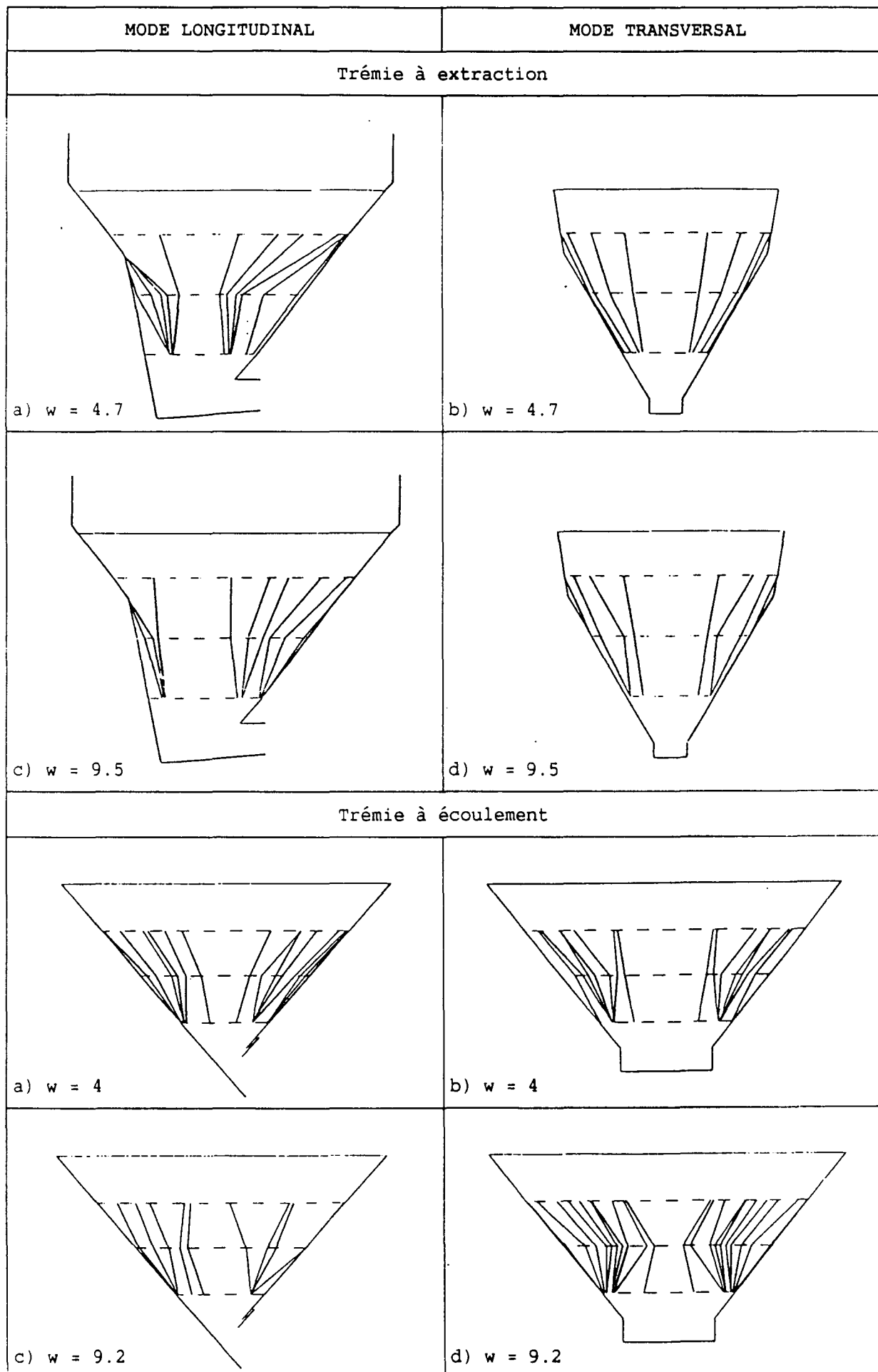


Figure 4.12 - Lignes de rupture avec le sable broyé calcaire 0/12

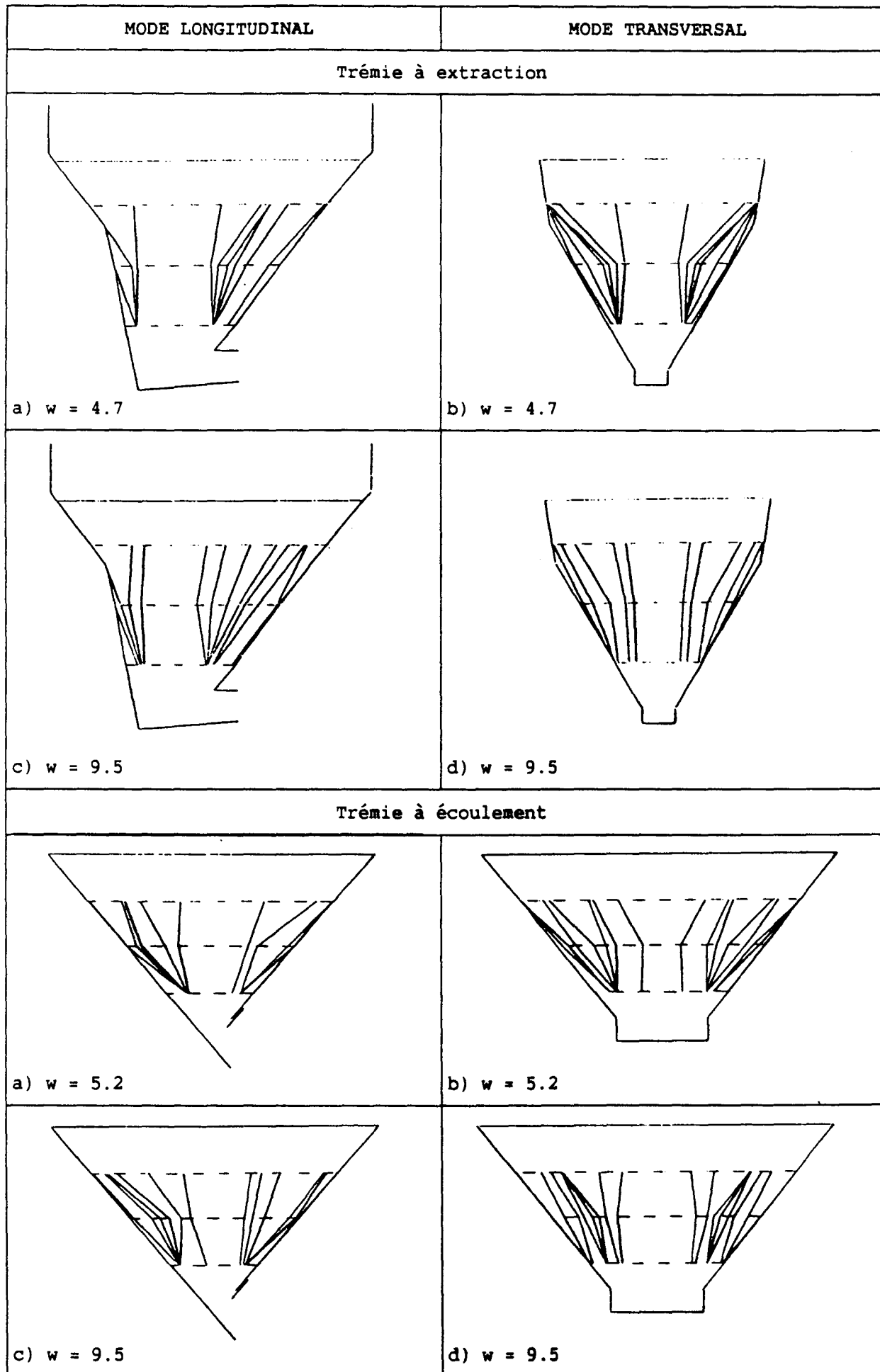
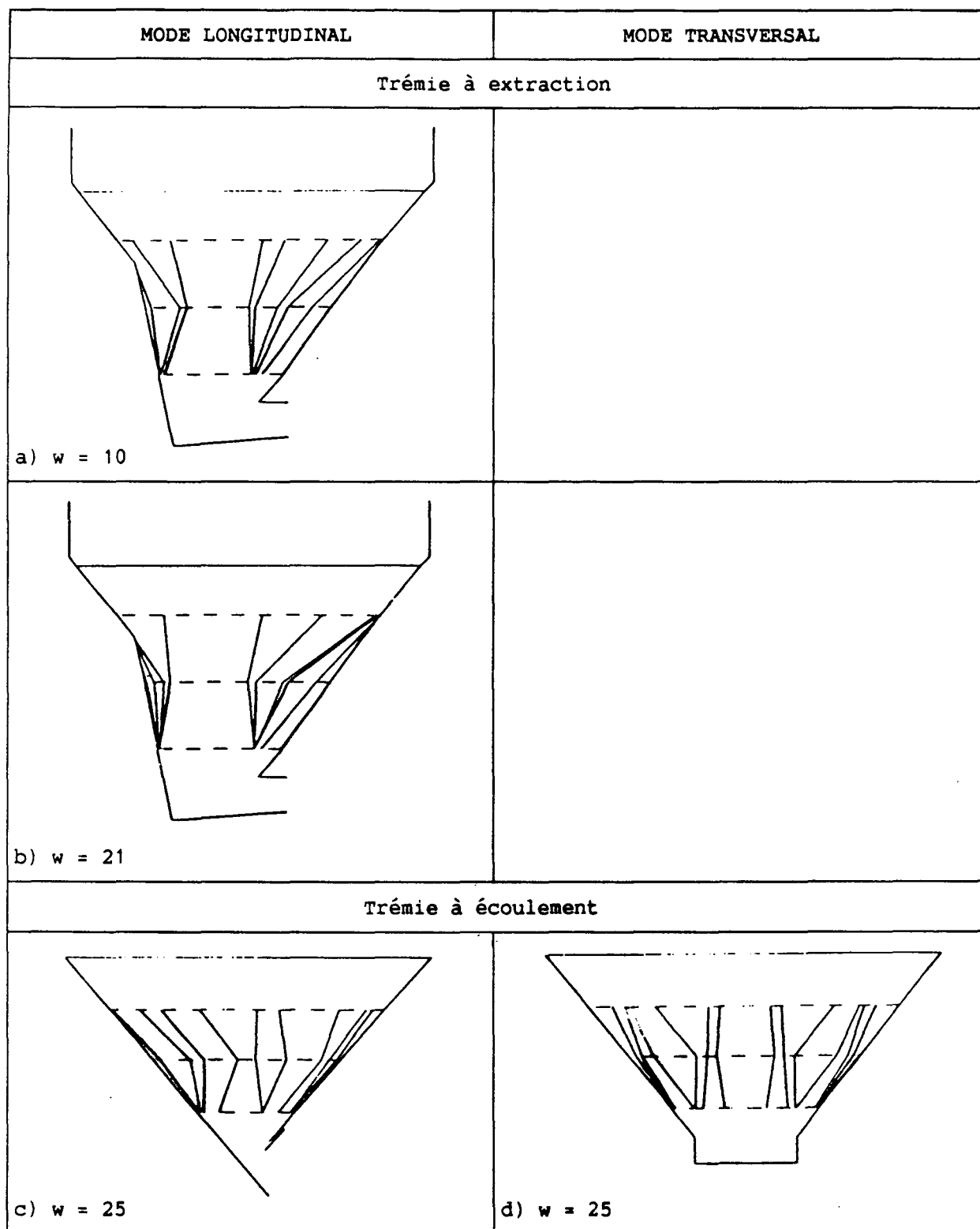


Figure 4.13 - Lignes de rupture avec les cendres volantes de Vitry-sur-Seine



La teneur en eau n'influe pas sur l'écoulement du sable broyé de Loire (fig 4.10). En revanche les schémas obtenus avec les trois autres matériaux ne permettent pas de dégager une conclusion tangible sur l'effet de ce paramètre. En effet le vibreur utilisé pour faciliter l'écoulement influe également :

- sur les profils où le vibreur est installé (profil transversal pour la trémie à extraction (Cf. fig 4.5) et profil longitudinal pour la trémie à écoulement (Cf. fig 4.6) celui-ci semble stabiliser l'écoulement (fig 4.11 b et d, fig 4.11 e et g).

- sur les profils sans vibreur on détecte des variations de la taille de la cheminée initiale lorsque on passe de la teneur en eau faible à la teneur en eau élevée mais les résultats montrent certaines contradictions entre les trémies et les matériaux (tableau 4.1).

Tableau 4.1 - Variation de la taille de la cheminée initiale avec la teneur en eau

Trémie	Extraction		Ecoulement	
Matériau	Variation	figures	Variation	figures
Sable broyé de Loire 0/2		4.11 a,c		4.11 f,h
Sable broyé calcaire 0/2		4.12 a,c		4.12 f,h
Cendres volantes		4.13 a,b	-	-

4.5.2 - INTERPRETATION DES RESULTATS DU TRAITEMENT DE LA DENSITE

4.5.2.1 - PHASE INITIALE DE L'ÉCOULEMENT

La phase initiale de l'écoulement correspond au passage du matériau de l'état statique à l'état dynamique. La masse volumique vrac du matériau diminue alors jusqu'à une certaine valeur optimale à l'écoulement autrement dit le matériau augmente de volume (fig 4.14 a). Cette phase, bien que brève, ne doit pas être négligée car elle engendre souvent une forte concentration de contrainte sur les parois [53, 54]. Son importance varie suivant le matériau. En effet au cours de l'expansion de volume certains matériaux tendent à former une voûte stable qui est :

- aussitôt désamorcée par le vibreur pour le sable broyé de Loire à teneur en eau élevée (fig 4.14 f et 4.17 c) et le sable calcaire 0/2 à teneur en eau élevée avec la trémie à écoulement (fig 4.16.b)
- beaucoup plus persistante pour les cendres volantes (fig 4.15 a, b et fig 4.17 e).

4.5.2.2 - INFLUENCE DE LA TENEUR EN EAU

Le critère de comparaison se base sur l'uniformité de la densité à la base de la trémie pendant l'écoulement. L'idéal est donc d'avoir une zone homogène entre le début et la fin de la vidange. Plus l'enregistrement comporte de zones homogènes, plus la densité fluctue donc le dosage devient plus difficile. On constate à partir des figures 4.14 à 4.17 que la teneur en eau :

- n'a pas d'influence sur la répartition de la densité vrac du sable roulé de Loire avec les deux trémies étudiées (fig 4.14 a, b et fig 4.17 a),
- n'agit pas sur la répartition de la densité du sable broyé calcaire 0/2 avec la trémie à extraction (fig 4.14 b, c) mais agit pour la trémie à écoulement (fig 4.16 a, b). C'est un point qui permet de comparer les deux trémies.
- influe sur la répartition de la densité du sable broyé de Loire 0/2 avec les deux trémies (fig 4.15 e, f) et fig 4.17 b, c). Le matériau le plus difficile à doser est les cendres volantes dont les enregistrements de la densité comportent des grandes dispersions aussi bien à teneur en eau faible (10 %) qu'élevée (25 %) (fig 4.15 a, b et fig 4.17 e).

4.5.2.3 - CLASSIFICATION DES MATERIAUX SUIVANT LE COMPORTEMENT AU DOSAGE

En considérant qu'une grande dispersion de la densité à la base de la trémie entraîne une difficulté de dosage (volumétrique), les matériaux testés peuvent être classés dans l'ordre croissant de cette difficulté :

- sable roulé de Loire
- sable broyé calcaire 0/2
- sable broyé calcaire 0/2
- cendres volantes de Vitry-sur-Seine

D'après les figures 4.18 e, f le sable broyé calcaire 0/6 se place avant le sable broyé calcaire 0/2 mais il faudra vérifier ce résultat avec d'autres essais. En tout cas ce matériau s'écoulait sans vibreur dans la trémie à écoulement à teneur en eau de 6,9 %. La place du sable broyé calcaire 0/2 avant le sable broyé de Loire est confirmée par le fait que ce premier matériau s'écoulait sans vibreur jusqu'à 5 % d'eau avec les deux trémies. La différence existant entre ces deux matériaux peut seulement provenir de leur différence en quantité de fines.

Ce classement est établi en prenant en compte toutes les conditions possibles de teneur en eau du matériau. En effet à teneur en eau faible les sables broyés ne présentent pas de difficulté particulière du point de vue dosage.

4.5.2.4 - COMPARAISON DES DEUX TREMIES

Dans le cas des matériaux montrant des difficultés de dosage (sable à forte teneur en eau et cendres volantes) les enregistrements de la densité comportent plus de fluctuations (plus de découpages en zones) avec la trémie à écoulement (fig 4.14.c, f et fig 4.15 b) qu'avec la trémie à extraction (fig 4.16 b et fig 4.17 c, e). Ainsi une trémie à extraction semble préférable à une trémie à écoulement pour des matériaux difficiles à doser.

4.5.2.5 - EFFET DE LA PRESENCE D'UN DISPOSITIF ANTI-VOUTE SUR L'ENREGISTREMENT DE LA DENSITE

La figure 4.17 d illustre l'évolution de la densité à la base de la trémie à écoulement équipée d'un dispositif anti-voûte avec le sable broyé de Loire à teneur en eau élevée. On constate que l'enregistrement comporte trois parties. La première et la troisième partie sont uniformes. Elles correspondent respectivement au passage des matériaux au-dessous et au-dessus du VE de décharge. La seconde partie correspond au passage du matériau de dessus pour alimenter en dessous de ce dernier. La densité faiblit dans cette partie jusqu'à ce que l'alimentation soit suffisante. En tout cas le VE décharge rend uniforme une bonne partie de la densité mis à part cette phase transitoire gênante. Par contre, celle-ci peut être éliminée en dosage pondéral et, dans ce cas, tout l'enregistrement devient uniforme.

Figure 4.14 - Densité à la base de la trémie à extraction avec découpage en zones homogènes

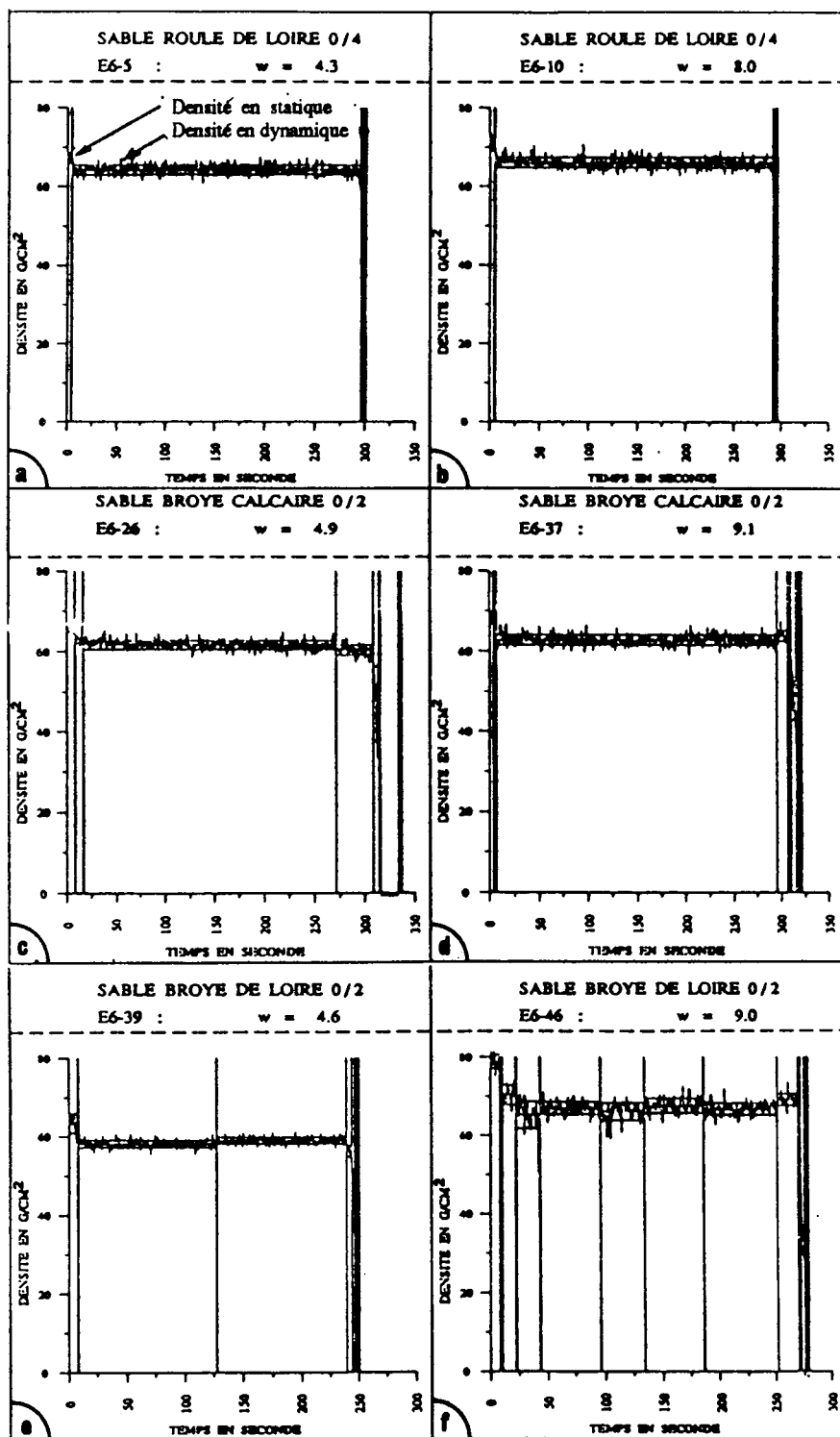


Figure 4.15 - Densité à la base de la trémie à extraction avec découpage en zones homogènes

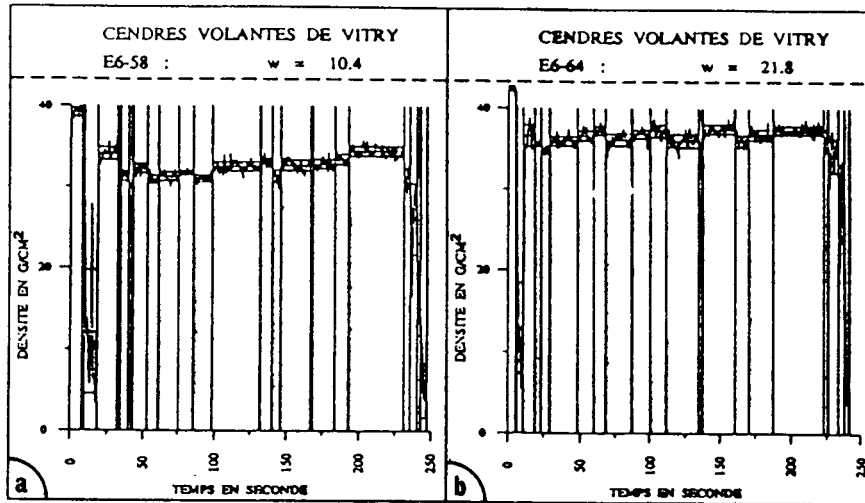


Fig 4.16 - Densité à la base de la trémie à écoulement avec découpage en zones homogènes

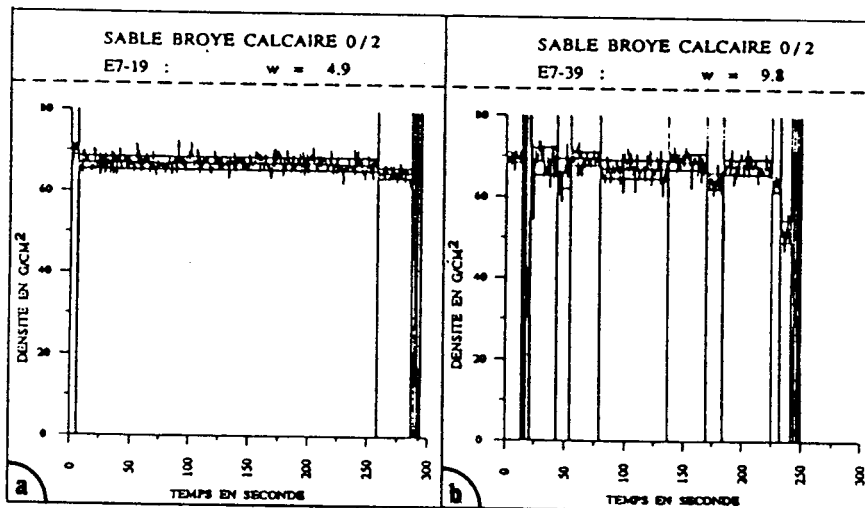
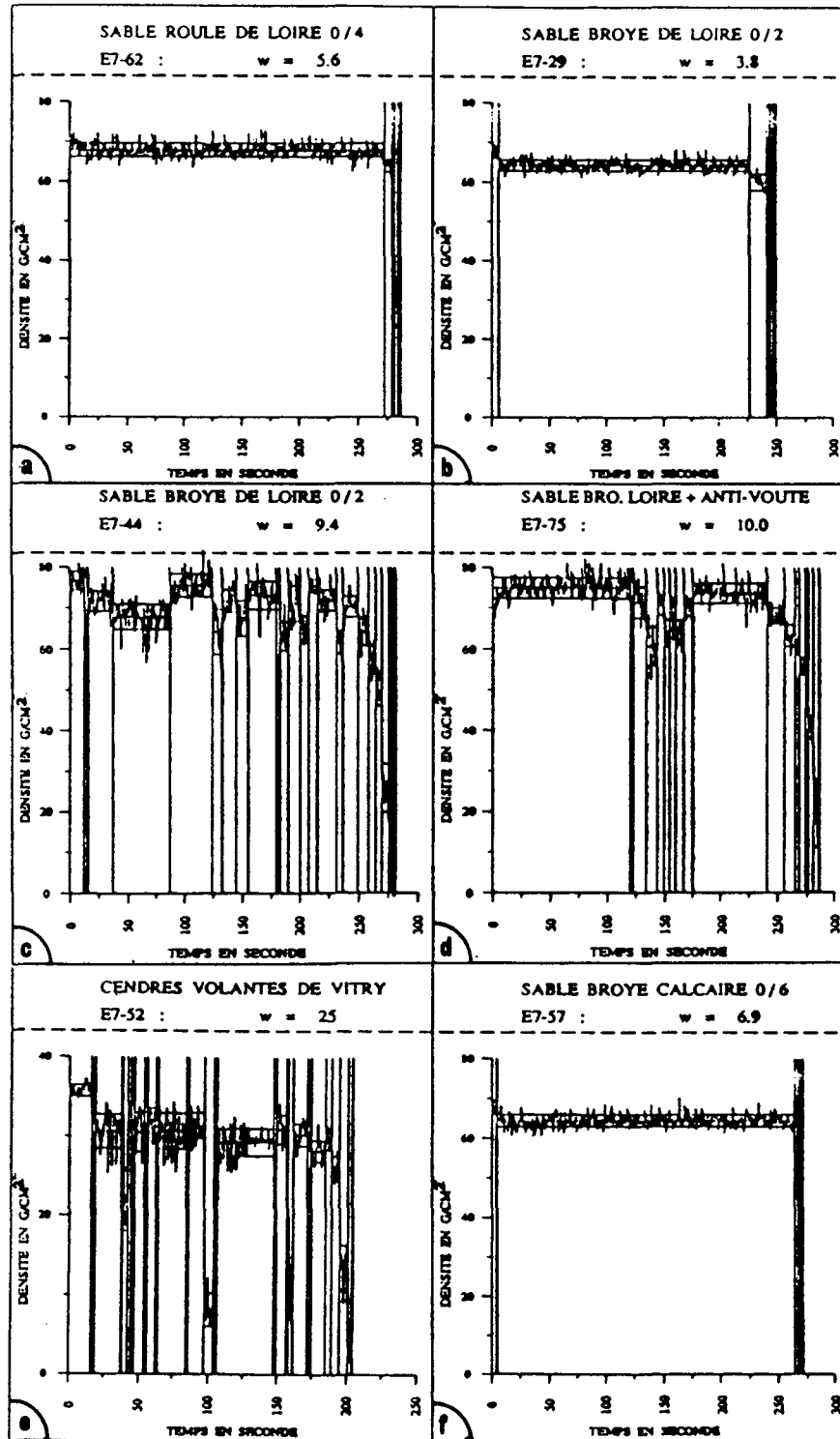


Figure 4.17 - Densité à la base de la trémie à écoulement avec découpage en zones homogènes



4.5.3 - SYNTHESE

L'utilisation des traceurs radioactifs permet de comprendre le mécanisme de l'écoulement des matériaux granulaires en trémies réelles grâce à une méthode de traitement qui visualise les lignes de rupture. Les résultats obtenus avec une trémie à extraction et une trémie à écoulement ont montré l'influence des paramètres de géométrie suivants :

- l'angle d'inclinaison de la paroi par rapport à la verticale dont l'accroissement augmente la rétention de matériau à la base d'une trémie,
- la plus grande dimension à la base de la trémie qui détermine la taille de la cheminée initiale,
- l'emplacement de l'orifice d'évacuation qui est à l'origine de la dissymétrie de l'écoulement.

Les schémas des lignes de rupture font aussi apparaître certaines différences de comportement entre les matériaux.

Le traitement des enregistrements de la densité à la base de la trémie constitue un complément important de l'étude.

En effet, les résultats reflètent les difficultés ou non à manipuler les matériaux pendant les essais. Il en résulte une classification des matériaux suivant le degré croissant de cette difficulté en prenant en compte les différentes conditions possibles de teneur en eau :

- sable roulé de Loire 0/4
- sable broyé calcaire 0/2 avec 15 % de fines
- sable broyé de Loire 0/2 avec 20 % de fines
- cendres volantes de Vitry sur Seine.

Enfin, les résultats montrent que la trémie à extraction semble présenter un domaine d'utilisation plus large comparativement à la trémie à écoulement.

CHAPITRE 5

EXPERIMENTATIONS SUR MODELE REDUIT A GEOMETRIE VARIABLE

5.1 - OBJECTIFS

Les expérimentations en trémies réelles, décrites au chapitre précédent, ont permis de comprendre le mode d'écoulement en cheminée que l'on rencontre le plus fréquemment dans la pratique. On sait aussi à présent comment les matériaux utilisés se comportent vis-à-vis de l'écoulement et comment les trémies étudiées répondent à ceux-ci. Il reste maintenant à savoir comment un matériau se comporte vis-à-vis de différentes configurations de trémie pour atteindre les objectifs de ce travail. Ce dernier objectif peut difficilement se réaliser en trémies réelles à cause de la lourdeur des essais et de la contrainte de temps. Ceci explique le choix des expérimentations sur un modèle réduit à géométrie variable. Les résultats constitueront des éléments de confrontation avec le modèle théorique établi au chapitre 2.

5.2 - DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

5.2.1 - LE MODELE REDUIT A GEOMETRIE VARIABLE

Le modèle réduit, une trémie bidimensionnelle à géométrie variable réalisée par le "Service Etudes et Construction de Prototypes" du LCPC permet de simuler différentes configurations de trémie réduites environ 5 fois par rapport à la taille réelle. Il comprend (fig. 5.1 et photo 5.1) :

- 2 parois verticales en plexiglas, rectangulaires et transparentes, permettant ainsi l'observation par caméra. Elles sont distantes de 18 cm. Cette distance assez grande et la présence de feuilles de rhodoïd lisses collées sur ces parois (Cf. 5.3.4), éliminent les effets de paroi sur l'écoulement à observer.
- 2 parois métalliques rectangulaires placées entre les plexiglas et à inclinaison θ_p variables de 12° à 42° par rapport à la verticale. Elles simulent la trémie à étudier.
- un système symétrique qui se rattache aux parois métalliques et qui permet de varier l'angle θ_p , l'ouverture à la base D, et l'ouverture de la trappe A de la trémie. Il évacue le matériau à un débit donné. Il peut être placé perpendiculairement au plan de la figure 5.1. Dans ce cas on simule l'écoulement dans une trémie suivant le sens perpendiculaire au sens d'évacuation du matériau. On dira que la trémie est en mode transversal.
- 4 pieds sur lesquels repose l'ensemble et équipés chacun de peson. Les pesons permettent de peser la trémie en permanence durant la vidange et d'en déduire le débit. Pour une raison évoquée dans la suite (Cf 5.4.3) trois pieds seulement servaient au cours de nos expérimentations.

Le réglage peut donner les deux types de trémie définis au 1.1.2.1, à savoir trémie à écoulement et trémie à extraction.

Modèle réduit à géométrie variable

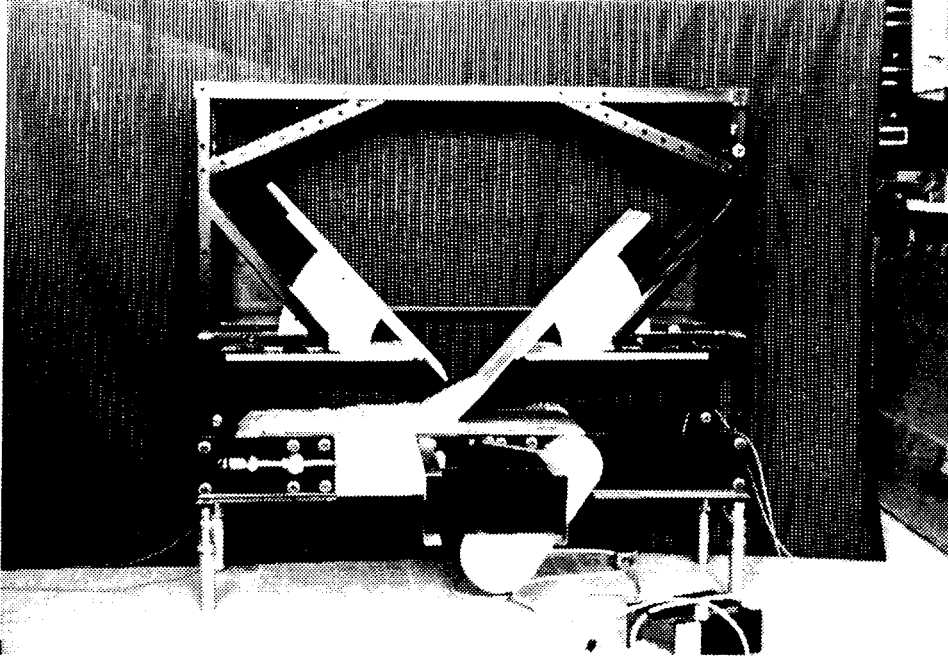


Photo 5.1 -

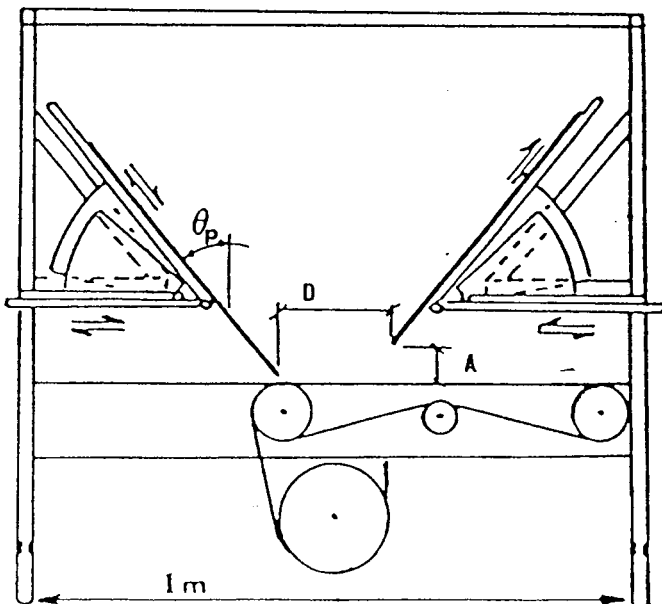


Figure 5.1 -

5.2.2 - LA CENTRIFUGEUSE

5.2.2.1 - CHOIX DE L'EXPERIMENTATION EN CENTRIFUGEUSE

La centrifugeuse sert beaucoup à l'étude des problèmes géotechniques statiques, cycliques ou dynamiques, car elle permet de recréer sur modèle réduit les mêmes contraintes et déformations que dans l'ouvrage réel. Les rapports de similitude, établis à l'annexe E1 et dont les résultats figurent dans le tableau 5.1, montrent en effet que, pour un modèle réduit N fois par rapport au prototype, il suffit d'effectuer l'essai sous une accélération artificielle N fois l'accélération de la pesanteur g . Ainsi, pour se rapprocher le plus possible des essais effectués en trémies réelles à la SEMR de Blois, nous avons choisi d'expérimenter en centrifugeuse. Les essais réalisés en collaboration avec l'équipe de la Section Modélisation en Centrifugeuse du LCPC, se déroulent donc à 5 g puisque le modèle simule des trémies réduites 5 fois par rapport à la taille réelle.

Tableau 5.1 - Principaux facteurs d'échelle pour la modélisation en centrifugeuse

GRANDEUR	Facteur d'échelles	GRANDEUR	Facteur d'échelles
Accélération	N	Masse volumique	1
Longueur	$1/N$	Vitesse	1
Déplacement	$1/N$	Contrainte	1
Déformation	1	Temps	$1/N$

5.2.2.2 - L'INSTALLATION

La centrifugeuse du L.C.P.C de Nantes, représentée par la photo 5.2, permet d'atteindre une accélération maximale de 200 g . Elle peut embarquer un modèle de 2000 Kg dans la nacelle. La distance entre le fond de cette dernière et l'axe central fait 5,50 m. Les autres caractéristiques techniques figurent à l'annexe E1.

5.2.3 - MATERIELS VIDEO

Une caméra de type CCD (charge coupled device) matricielle visualise les images de l'écoulement dans la trémie grâce à l'utilisation de marqueurs colorés. Un magnétoscope U - MATIC SONY VO 9600 SP enregistre ces images. La caméra supporte des accélérations allant jusqu'à 80 g donc elle a été embarquée dans la nacelle de la centrifugeuse. Le magnétoscope, ayant des spécifications mécaniques plus limitées, a été installé près de l'axe de rotation afin de minimiser l'effet de l'accélération.

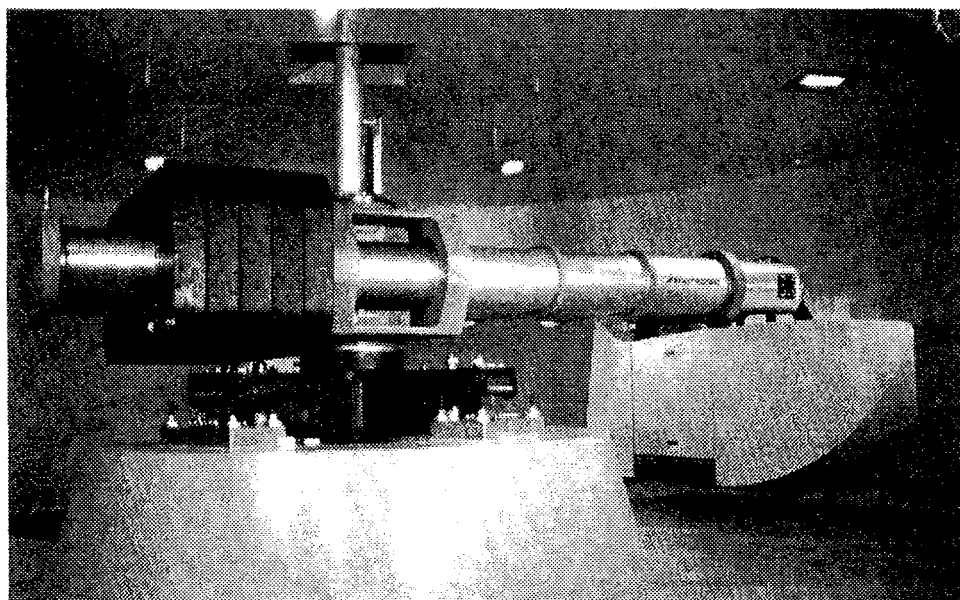


Photo 5.2 - La Centrifugeuse

5.3 - METHODES DE MESURE

5.3.1 - MESURE DU DEBIT D'ECOULEMENT

Grâce à une chaîne d'acquisition référencée UPH 3200 HBM on enregistre les déformations des pesons pendant la vidange. Cet enregistrement traduit l'évolution du poids de la trémie lors de cette vidange. Un étalonnage préalable (Cf 5.4.3) permet de calculer les poids à partir des déformations enregistrées. Il en résulte le débit d'écoulement connaissant la durée de chaque prise de données.

5.3.2 - MARQUAGE PAR POINTS COLORES

Pour étudier le mécanisme de l'écoulement et déterminer la distribution de vitesse, on installe dans le matériau des rangées de points de couleur différente de celle du matériau et visibles à travers la paroi en plexiglas. Des essais préliminaires montrent que la couleur blanche offre le meilleur contraste avec les matériaux utilisés (sables de Loire). La caméra, placée en face de la paroi transparente, suit les mouvements des points blancs (sable coloré) pendant l'écoulement. Une technique de traitement numérique d'images (Cf 5.5) permet ensuite de reconstituer et chiffrer les différentes positions de ces points.

5.3.3 - MESURE DE LA VITESSE DU TAPIS

La mesure de la vitesse du tapis se fait à l'aide d'un codeur optique ROGO type PF 06500/75, adapté pour donner 5 impulsions par tour, fixé en prise directe sur l'axe moteur du tambour et relié à un convertisseur fréquence-tension (HOHNER type 5725). Ce dernier délivre une tension (continue) proportionnelle à la vitesse du tapis d'après l'étalonnage décrit au 5.4.4. Cette tension est enregistrée et visualisée sur un oscilloscope pendant l'essai afin de contrôler la régularité du débit d'écoulement.

5.3.4 - MODE OPERATOIRE

Les préparatifs d'un essai commence par le réglage de la trémie à la configuration voulue. Pour protéger les plexiglas contre les rayures, on fixe sur chacune de leurs faces intérieures une feuille de rholoïd transparente, lisse et remplaçable lorsqu'elle comporte trop d'usures. Le remplissage de la trémie s'effectue manuellement en faisant tomber le matériau de la même hauteur jusqu'à ce qu'il atteigne un certain niveau dans la trémie. Après avoir nivelé à l'aide d'une spatule, une rangée de points horizontale est matérialisée, juste à la surface de la paroi face à la caméra, en injectant du sable coloré (blanc). Le remplissage reste identique pour le marquage de 3 à 4 rangées dans le modèle.

L'essai proprement dit débute par la montée jusqu'à 5 g de l'accélération dans la nacelle de la centrifugeuse. On déclenche presque en même temps que cette montée en régime les systèmes d'acquisition d'images (caméra et magnétoscope) et des signaux fournis par les pesons. Cette montée en accélération densifie le matériau. Pour des essais identiques (répétitivité) elle tend à ramener le matériau à la même densité avant la vidange donc elle corrige les éventuelles imperfections du remplissage manuel. Après quelques secondes de stabilisation à 5 g on commence la vidange en démarrant le tapis doseur. Lorsque l'écran de contrôle indique que la trémie est vide on arrête le tapis, la centrifugeuse et les acquisitions.

5.4 - LES ESSAIS REALISES

5.4.1 - MATERIAUX

L'analyse des résultats des essais en trémies réelles et des essais de caractérisation des matériaux justifie le choix des matériaux utilisés dans cette étude. Il s'agit du :

- sable roulé de Loire, de taille maximale 4 mm et de teneur en fines négligeable. Ce matériau s'écoule facilement. Il est pris à la teneur en eau faible (environ 3 %).
- sable broyé de Loire, de taille maximale 2 mm et contenant environ 20 % de fines. Cette quantité de fines assez importante fait que son écoulement dépend de sa teneur en eau. On retient pour

cette dernière une valeur faible (environ 4 %) et une valeur élevée (environ 8 %). La teneur en eau élevée s'obtient par mouillage puis malaxage pour homogénéiser.

5.4.2 - VERIFICATION DE LA BIDIMENSIONNALITE DE L'ECOULEMENT.

- Pour la position en mode longitudinal du tapis (Cf fig. 5.1), le test de bidimensionnalité résumé par la figure 5.2 a été vérifié : une bande colorée horizontale et perpendiculaire aux parois transparentes à l'instant t_n reste horizontale et perpendiculaire à celles-ci à l'instant t_{n+1} . Il suffit en effet d'arrêter l'écoulement à l'instant t_{n+1} et de dégager une partie du matériau pour visualiser la bande colorée. L'existence d'humidité dans le matériau l'empêche de s'écrouler et facilite cette opération. En conclusion un point coloré placé en surface de la paroi transparente représente bien toute l'épaisseur de matériau (écoulement bidimensionnel).

- Pour la position en mode transversal du tapis (perpendiculaire au plan de la figure 5.1) la bidimensionnalité fait défaut, notamment au voisinage de l'orifice de sortie. En effet, l'extraction s'effectue perpendiculairement au plan de convergence de l'écoulement. Le mouvement des grains a donc 3 composantes. Les points colorés placés en surface ne représentent plus rigoureusement ce qui se passe à l'intérieur du matériau, notamment au voisinage de la sortie. Nous avons néanmoins effectué quelques essais en mode transversal ne serait-ce que pour voir la forme de l'écoulement.

5.4.3 - ETALONNAGE DES PESONS

L'étalonnage consiste à établir une relation entre les indications en microdéformation des pesons à accélération 5 g et les poids "trémie + matériau" qui provoquent leurs déformations. On relève les déformations des pesons pour différentes quantités de matériau dans la trémie puis on trace la courbe "poids - déformation". Les résultats montrent une relation linéaire lorsque la trémie repose sur trois pieds (Cf fig. 5.3-a,b). En revanche, avec 4 pieds, cette relation n'est plus linéaire (Cf fig. 5.3c) En fait, il se produit une sorte de transfert mutuel de charge entre deux pieds en diagonale au cours de la centrifugation. Or l'acquisition ne se fait pas simultanément sur ces deux pieds. Il peut alors y avoir perte d'information si au moment de l'acquisition sur le second pied la charge bascule sur l'autre pied. Pour cette raison tous les essais étaient effectués avec la trémie montée sur 3 pieds.

5.4.4 - ETALONNAGE DU CAPTEUR DE VITESSE DU TAPIS

Il s'agit de déterminer la vitesse du tapis (en m/min) à partir de la tension obtenue avec le convertisseur fréquence-tension. Pour cela on relève, pour différentes positions du potentiomètre de commande du tapis, les tensions correspondantes délivrées par le convertisseur et les vitesses du tapis correspondantes (en m/min) mesurées à l'aide d'un tachymètre par contact direct. Les résultats de cet étalonnage, donnés à l'annexe E2.3, montrent que ces deux paramètres sont proportionnels.

Figure 5.2 - Vérification de la bidimensionnalité de l'écoulement

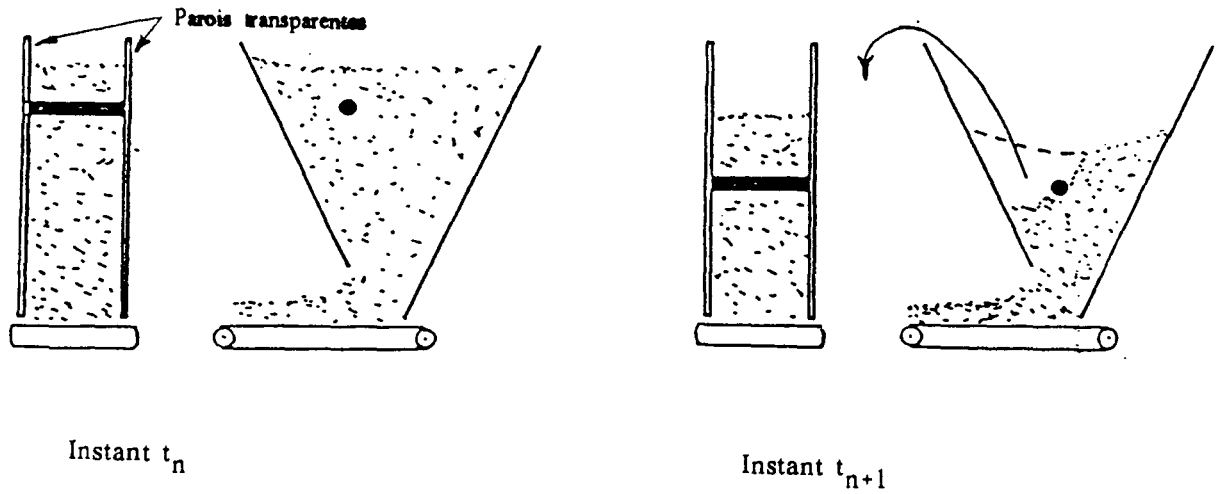
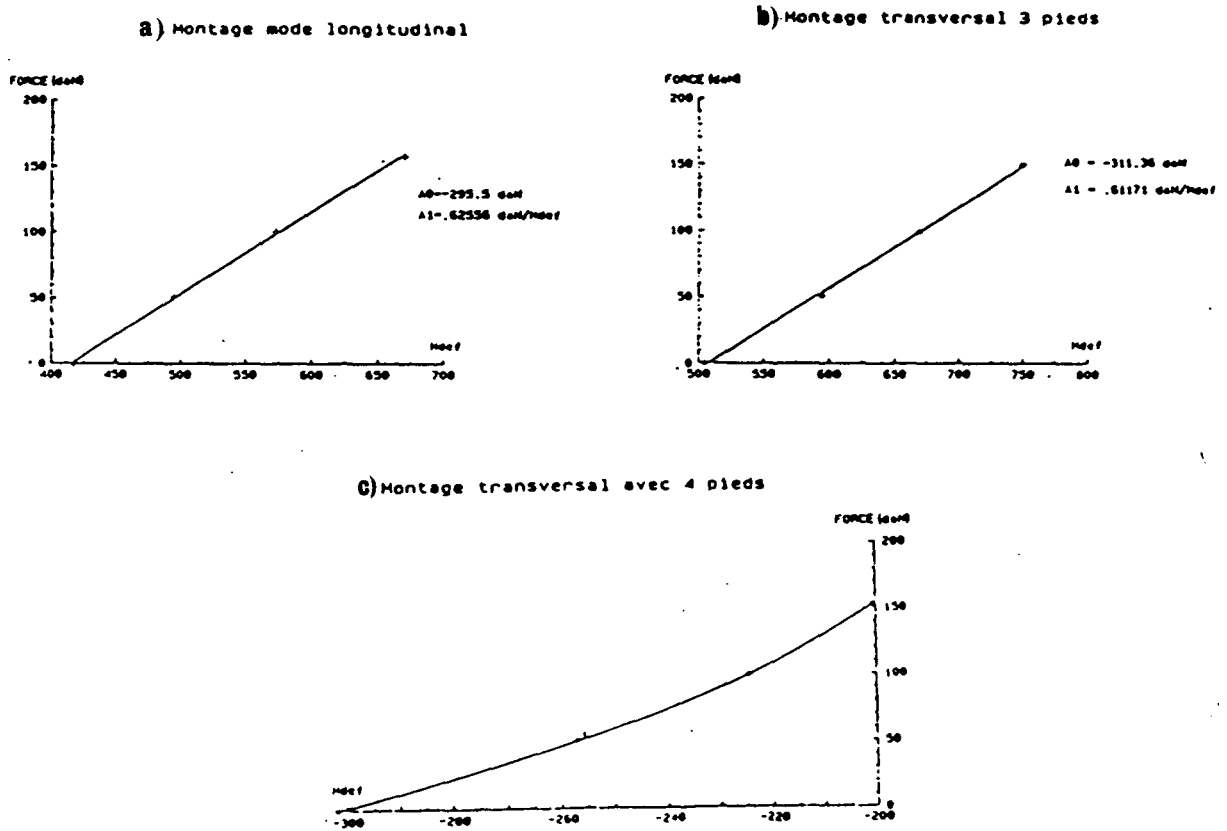


Figure 5.3 - Etalonnage Pesons



5.4.5- DEROULEMENT DES ESSAIS

La démarche consiste à faire varier la dimension à la base D de la trémie, pour une inclinaison θ_p donnée de la paroi, de façon à mettre en évidence soit une voûte stable, soit un écoulement en cheminée, soit un écoulement en masse (Cf fig 5.1) :

- pour les essais en mode longitudinal, θ_p prend les valeurs 20° , 30° et 40° . D varie de 1 cm à 15 cm. L'ouverture de la trappe A vaut 5 cm pour la plupart des essais sauf pour ceux destinés à voir l'influence de A et pour quelques configurations de trémie à écoulement,

- les essais en mode transversal ont été effectués avec $\theta_p = 20^\circ$, $D = 10$ cm et $A = 6$ cm.

Le détail du plan d'expérience figure dans les tableaux e.2 à e.6 de l'annexe E.

Les essais n'ont pu être effectués avec une vitesse du tapis de 15 m/min comme les essais en trémie réelles effectués à la SEMR de Blois. En effet, la trémie se vide trop rapidement (moins de 10 s) et la visualisation sur l'oscilloscope montre qu'il n'existe presque pas de phase stable dans l'enregistrement de la vitesse du tapis. Autrement dit le débit ne peut être constant. Ainsi il a fallu effectuer les essais avec une vitesse du tapis plus faible (de l'ordre de 6 à 10 m/min) afin que celle-ci puisse se stabiliser suffisamment avant la fin de la vidange.

Pour vérifier la répétitivité, un essai a été répété 5 fois avec le même réglage en gardant la même quantité de matériau et les mêmes positions des points colorés (essais DOD 54 à DOD 58 du tableau e.1). Certains essais ont été répétés deux fois mais les positions des points marqueurs n'ont pas été rigoureusement respectées.

Lorsque la voûte se maintient à 5 g, on augmente l'accélération jusqu'à une certaine valeur g_1 pour laquelle celle-ci s'écroule. La connaissance de g_1 permet de déterminer la dimension minimale à la base de la trémie pour éviter la formation de voûte stable (Cf. tableau 5.4).

Les essais présentés dans le tableau 5.5 ont été effectués avec des configurations proches de celles des trémies réelles (Cf. fig 4.5 et fig. 4.6) utilisées à la S.E.M.R de Blois. La simulation de la trémie à extraction ne donnait pas entière satisfaction. En effet cette trémie présente une ouverture d'environ 85 cm à sa base, soit 17 cm pour le modèle réduit. Or ce dernier possède une épaisseur de 18 cm, soit 90 cm pour le modèle réel. Le moteur du tapis encaisse donc la charge sur 17 cm x 18 cm c'est-à-dire 85 cm x 90 cm pour un modèle réel. Ainsi l'écoulement a été fortement ralenti voire bloqué avec le sable broyé de Loire à teneur en eau élevé (8% environ) à cause de l'insuffisance en puissance du moteur.

5.5 - TRAITEMENT D'IMAGES ET EXPLOITATIONS

5.5.1 - MATERIELS.

Les images stockées sur le magnétoscope sont numérisées puis traitées par un micro-ordinateur de type COMPACQ 80386 / 20 MHZ. Une carte de vision (réf. MVP AT MATROX), au format 512 x 512 x 8 bits, effectue la numérisation (sur 256 niveaux de gris).

Le système d'exploitation utilisé ne permet pas de gérer aisément l'horloge interne du micro-ordinateur, à savoir qu'on peut seulement récupérer 18 tops horloge par seconde soit une résolution de l'ordre de 50 millisecondes. Cette résolution s'avère insuffisante donc un système externe a été utilisé. Ce système se compose d'un générateur de fréquences synthétisées associé à une carte de comptage et offre une résolution de 1 milliseconde.

5.5.2 - LOGICIEL D'ANALYSE

La figure 5.4 représente un organigramme du logiciel de traitement mis au point en collaboration avec le groupe "analyse d'images" de la section instrumentation du LCPC. L'algorithme a été développé de façon à déterminer le plus précisément possible, les différentes positions du centre de gravité de la tache (le point à suivre, constitué de plusieurs pixels, peut être assimilé à une tache). Il doit prendre en compte la forme de la tache et s'affranchir autant que faire se peut de sa déformation pendant l'écoulement. Il arrive, en effet, que cette déformation est si grande que la tache devient un fin filet. Dans cette condition la recherche du centre de gravité du point devient impossible provoquant ainsi l'arrêt du suivi.

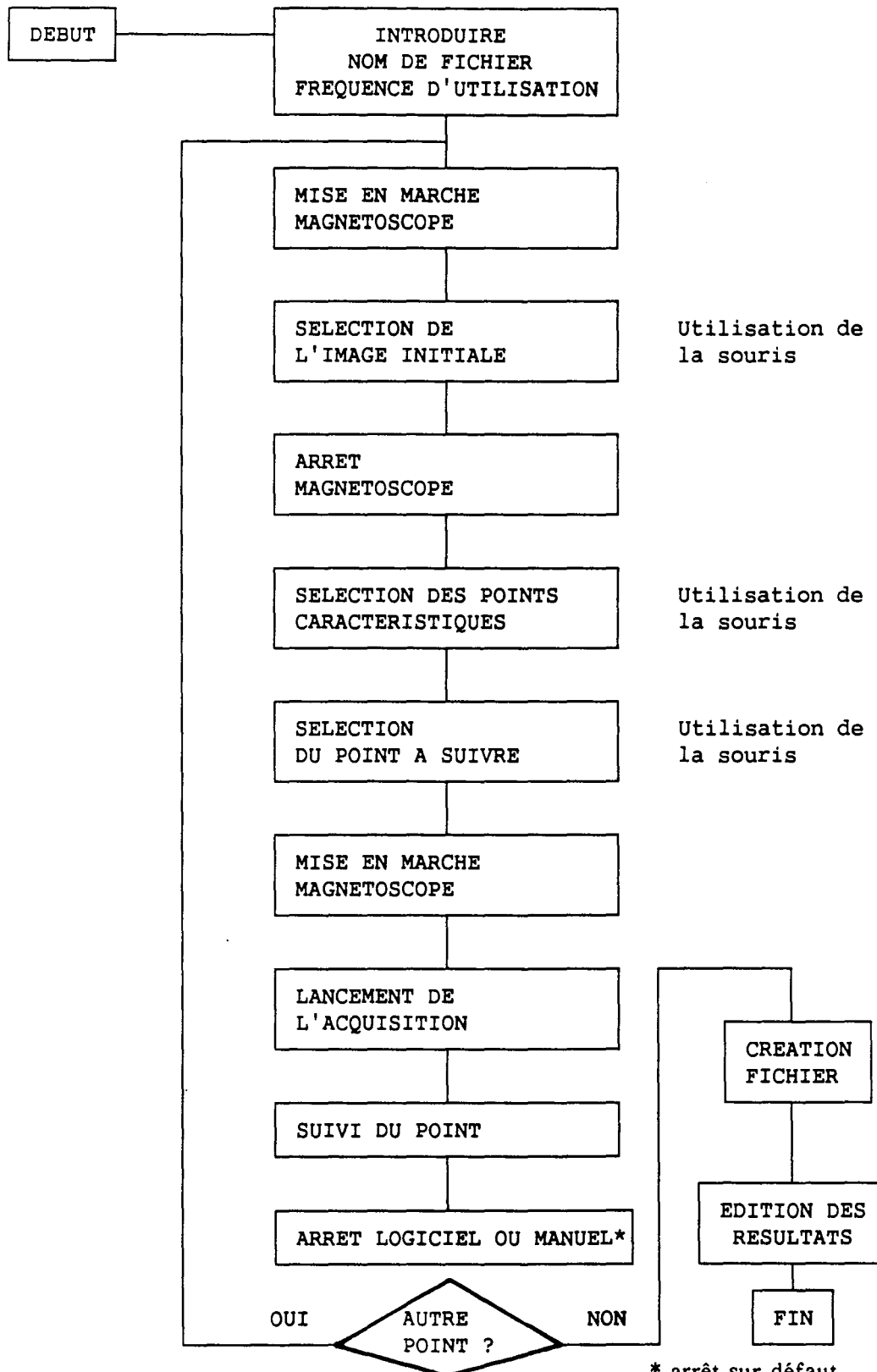


Figure 5.4 - Organigramme du logiciel d'analyse

5.5.3 - FREQUENCE D'ANALYSE

La bande passante du système limite la fréquence d'acquisition des images. Cette fréquence dépend du standard sous lequel fonctionne le matériel utilisé. Il s'agit du standard CCIR, soit 50 Hz, d'où un temps d'acquisition de 40 ms. Si on désire analyser une image sur deux, il faut 40 ms pour l'acquisition de l'image et au maximum 40 ms (temps correspondant au passage de l'image non sélectionnée) pour le traitement afin de pouvoir récupérer le prochain top de synchronisation. Il faut, dans ce cas utiliser un ordinateur performant en temps d'exécution. En ce qui nous concerne, un co-processeur arithmétique, associé au calculateur, permet de réduire les temps de calcul. L'écriture du Logiciel en langage C contribue à l'optimisation du temps d'exécution. Nous avons alors retenu une fréquence d'analyse de 160 ms (tableau 5.2) et 200 ms pour certains cas. Ce choix prend en compte la vitesse à laquelle se déroule l'écoulement et le critère de suivi d'un point.

Tableau 5.2 - Représentation d'une séquence d'analyse

Image	Trame	Phase	Séquence
1	Paire	Acquisition n 40 ms	Séquence n 160 ms
	Impaire		
2	Paire	Traitement n 120 ms	
	Impaire		
3	Paire		
	Impaire		
4	Paire		
	Impaire		
5	Paire	Acquisition n+1	Séquence n+1
	Impaire		
. . .	Paire	Traitement n+1	
	Impaire		

5.5.4 - SUIVI D'UN POINT COLORE

5.5.4.1 - INITIALISATION

L'initialisation d'une séquence d'analyse nécessite l'introduction de deux paramètres :

- la fréquence d'acquisition
- la position du point à suivre

Grâce à la visualisation sur un écran de contrôle l'opérateur repère, au moyen du curseur de la souris, la position du point à suivre. Cette opération détermine autour de ce point une fenêtre qui délimite la zone de recherche pour le début de la séquence.

5.5.4.2 - DETERMINATION DE LA ZONE DE RECHERCHE DU POINT

Compte tenu de la vitesse à laquelle se déroule l'écoulement, la recherche s'effectue autour de la position précédente de la tache (point coloré). Les dimensions de la zone de recherche dépendent du diamètre ϕ de cette tache. Cette zone s'étend à 1ϕ au-dessus de la position précédente de cette dernière, à 3ϕ au-dessous et à 2ϕ de chaque côté. ϕ est recalculé à la suite de chaque acquisition pour prendre en compte la déformation éventuelle de la tache.

5.5.4.3- DETERMINATION DU CENTRE DE GRAVITE DU POINT

Les sommes en pixels suivant ox et oz (fig. 5.5) dans la fenêtre de recherche permettent de projeter l'image suivant ces deux axes. Les maxima et minima de ces projections en niveau de gris donnent le seuil suivant la formule :

$$\text{Seuil} = \min + (\max - \min)/2 \quad (5.1)$$

Le diamètre de la tache et les coordonnées de son centre de gravité résultent de la connaissance du seuil. Leurs valeurs, exprimées en pixels, vont ensuite être transformées en grandeurs physiques grâce à un étalonnage préalable :

- 1570 pixels sur 253 mm suivant ox
- 2295 pixels sur 253 mm suivant oz

Le matériel permet d'avoir une précision de l'ordre de 0.1 pixel sur 512 pixels, soit 2.10^{-4} .

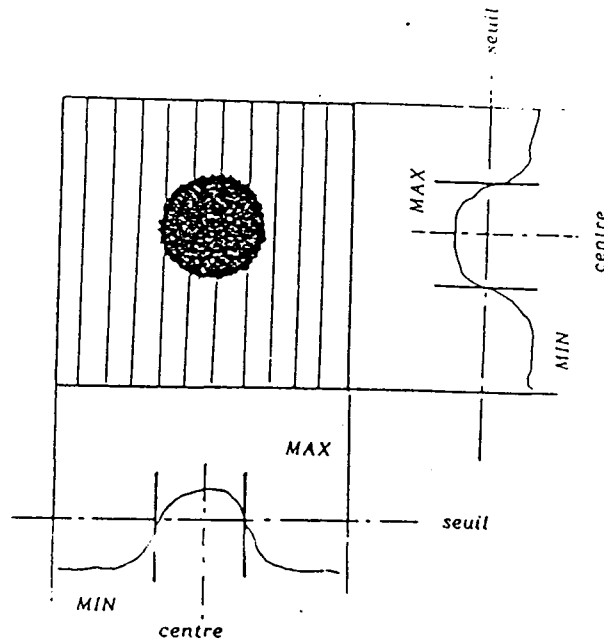


Figure 5.5 - Détermination du centre de gravité d'un point

5.5.5 - VISUALISATION DES TRAJECTOIRES DES POINTS

Après chaque séquence de traitement, l'opérateur peut vérifier et valider le résultat. Un programme lui permet de visualiser sur le moniteur les trajectoires des points suivis :

- soit en surimpression sur l'image de la trémie,
 - soit sur un fond noir avec la représentation schématique de la trémie.
- Les différentes positions des points marqueurs étant stockées sur fichiers, ces mêmes trajectoires peuvent être visualisées sur un écran d'ordinateur et sorties sur imprimantes.

5.5.6 - DETERMINATION DE LA DISTRIBUTION DE VITESSE EN ECOULEMENT DE MASSE

5.5.6.1 - VITESSES INDIVIDUELLES DES POINTS MARQUEURS

Désignons par (x_{i-1}, z_{i-1}) et (x_i, z_i) , les positions du centre de gravité du point respectivement aux instant t_{i-1} et t_i , puis par Δt la fréquence d'analyse. La vitesse individuelle de ce point à l'instant t_i a pour composantes :

- suivant ox :

$$v_x = \frac{x_i - x_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} = \frac{x_i - x_{i-1}}{\Delta t} \quad (5.2)$$

- suivant oz :

$$v_z = \frac{z_i - z_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} = \frac{z_i - z_{i-1}}{\Delta t} \quad (5.3)$$

En module cette vitesse s'écrit :

$$v = (v_x^2 + v_z^2)^{\frac{1}{2}} \quad (5.4)$$

Il devient possible, à présent de faire les représentations graphiques de $x(t)$ et $z(t)$ puis de $v_x(t)$, $v_z(t)$ et $v(t)$.

5.5.6.2 - DISTRIBUTION DE VITESSE DANS LA TREMIE

Connaissant les vitesses individuelles des points marqueurs à un instant t donné, un logiciel (UNIMAP) permet de faire une interpolation dans toute la trémie. Il en résulte la distribution de vitesse à l'instant t .

La représentation graphique montre les lignes iso-vitesses dans la trémie à l'instant t ainsi que les valeurs de la vitesse le long de ces lignes.

5.5.7 - DETERMINATION DE LA VITESSE MOYENNE DU TAPIS

L'enregistrement de la vitesse du tapis (fig. 5.6) comporte une phase transitoire au début et à la fin de la vidange puis une phase stable entre les deux. La vitesse moyenne s'obtient à partir des valeurs enregistrées dans cette phase stable.

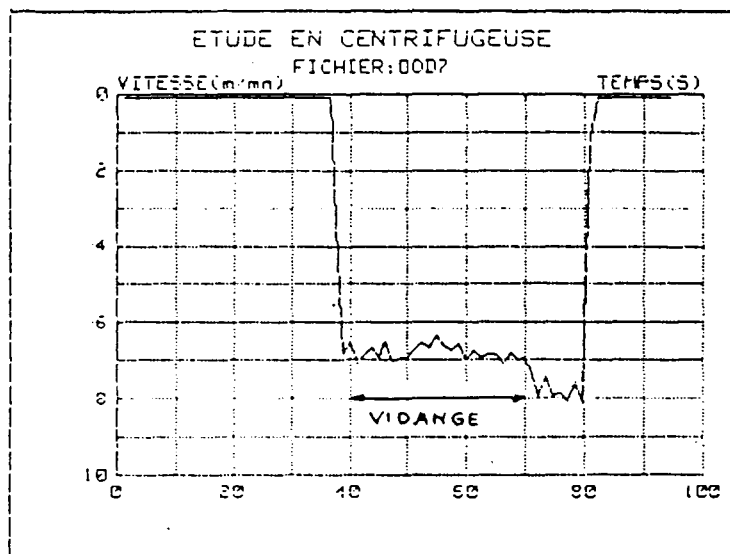


Figure 5.6 - Enregistrement de la vitesse du tapis

5.5.8 - CALCUL DU DEBIT D'ECOULEMENT

Les représentations graphiques (cf fig 5.7) montrent que le poids du matériau F dans la trémie décroît linéairement avec le temps t pendant la vidange. Pour déterminer le débit pondéral q_f on lisse $F(t)$ en une droite dans l'intervalle où la vitesse du tapis est stable. La pente de cette droite, égale à q_f , s'exprime en daN/s .

Le débit massique q_m correspondant s'obtient par la formule :

$$q_m = \frac{q_f}{Ng} \quad (5.5)$$

avec $N = 5$

Le débit massique q_p dans le prototype ainsi simulé par le modèle réduit s'écrit alors (voir rapports de similitude dans le tableau e.1 de l'annexe E) :

$$q_p = q_m N^2 = \frac{q_f N}{g} \quad (5.6)$$

5.5.9 - CALCUL DE LA DUREE DE VIDANGE

Soient t_1 et t_2 le début et la fin de la vidange puis q le débit d'écoulement. La fonction $F(t)$ reliant le poids du matériau et le temps de vidange peut s'écrire (cf fig 5.7) :

$$\begin{aligned} - F &= F_{\max} && \text{pour } t \leq t_1 \\ - F &= q_f + F_0 && \text{pour } t_1 < t < t_2 \\ - F &= 0 && \text{pour } t \geq t_2 \end{aligned}$$

q et F s'obtiennent par le lissage signalé ci-dessus. On a alors :

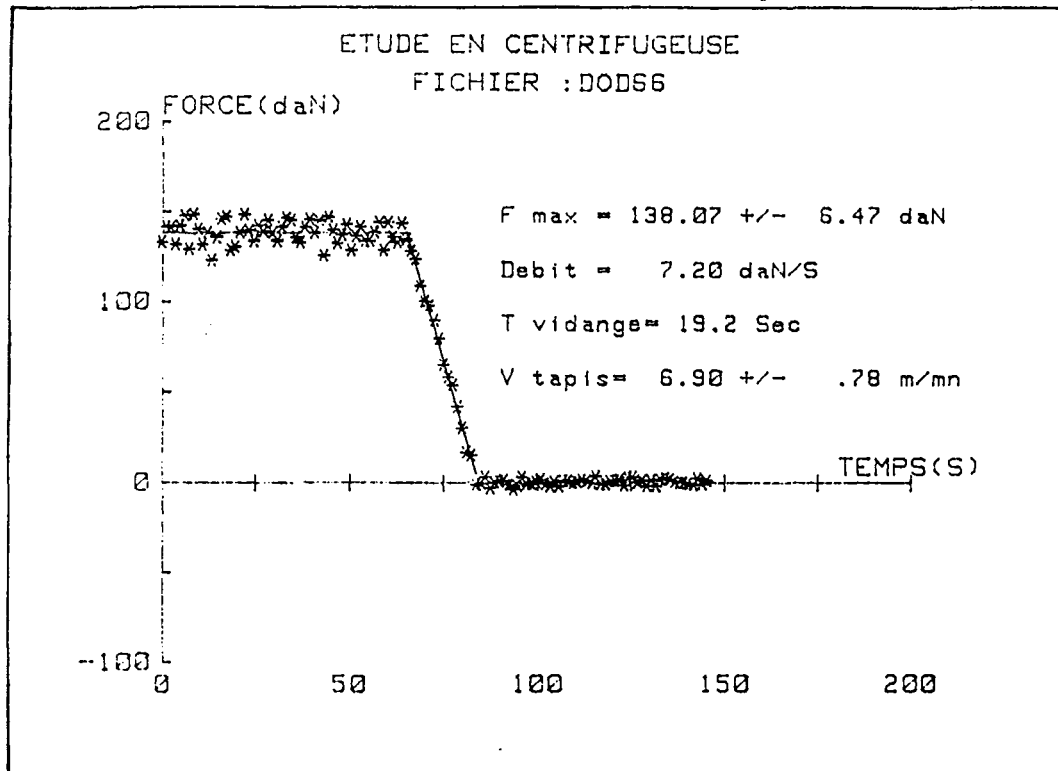
$$t_1 = \frac{F_{\max} - F_0}{q_f} \quad (5.7)$$

$$t_2 = \frac{-F_0}{q_f} \quad (5.8)$$

La durée de vidange vaut :

$$t_v = t_2 - t_1 \quad (5.9)$$

Figure 5.7 - Evolution du poids de matériau dans la trémie pendant la vidange



5.6 - ANALYSE DES RESULTATS

Les résultats obtenus avec le modèle réduit peuvent être transposés au cas du prototype correspondant grâce aux rapports de similitude établis à l'annexe E.1. Il suffit, par exemple, de multiplier la longueur et le temps par $N=5$, le débit massique par N^2 , et de conserver la vitesse ainsi que la contrainte.

5.6.1 - OBSERVATIONS SUR LA DETERMINATION DU DEBIT, DE LA VITESSE DU TAPIS ET DU TEMPS DE VIDANGE

Les résultats du traitement des enregistrements des pesons et du codeur optique figurent dans le tableau 5.3 pour les essais de vérification de la répétitivité et dans le tableau 5.7 de l'annexe E2 pour les autres essais. Tant que l'écoulement se déroule normalement, le poids de matériau dans la trémie décroît linéairement pendant la vidange comme le montre la figure 5.7. Les enregistrements des pesons présentent parfois une assez importante dispersion avec une trémie pleine en se référant aux valeurs des écarts types calculés sur les valeurs du poids total de matériau F_{max} . Ce phénomène apparaît sur la figure 5.7 et peut être dû en partie à une légère instabilité de la trémie (pleine) dont le quatrième pied a été suspendu (cf 5.4.3). En revanche lorsque l'écoulement commence les enregistrements deviennent réguliers. La fluctuation de F_{max} semble donc ne pas influencer sur la valeur du débit calculé mais peut engendrer une petite erreur sur le calcul de la durée de vidange. Mais comme ce dernier paramètre n'entre pas dans la partie confrontation avec le modèle théorique, il n'est pas nécessaire de le déterminer avec précision. Les résultats montrent aussi une assez importante dispersion de la vitesse du tapis calculée pour certains essais. On remarque

cependant que cette dispersion s'atténue lorsque l'écoulement dure suffisamment longtemps (≥ 30 s). Ainsi une acquisition plus rapide (au lieu des deux prises de données par seconde effectuées) semble améliorer la dispersion des enregistrements de la vitesse du tapis ; de même pour le cas des pesons.

Pour l'ensemble des essais le débit massique varie de 0.6 kg/s à 2 kg/s avec une moyenne d'environ 1.28 kg/s pour le modèle réduit soit une variation de 54 à 180 t/h et une moyenne de 115 t/h pour le prototype correspondant. Ces valeurs correspondent aux estimations car le modèle réduit a été conçu sur une base de 120 t/h. Le tableau 5.3 permet aussi de comparer, pour quelques essais, le poids total de matériau mesuré avant l'essai et sa valeur calculée à partir des enregistrements des pesons. L'écart ne dépasse pas 5 % ce qui signifie une bonne concordance. Il faut tout de même signaler que les indications des pesons sont inférieures aux poids mesurés. Pour l'ensemble des essais la vitesse du tapis varie de 5,6 m/min à 10 m/min. La valeur de celle-ci a été choisie de telle manière que son enregistrement possède une phase stable suffisante pour déterminer le débit. La durée de vidange varie de 11 s à 45 s pour l'ensemble des essais, soit de 55 s à 3 min 45 s avec le prototype. Ce temps relativement court correspond au cas d'une trémie bidimensionnelle de 0.9 m d'épaisseur et valide ainsi le choix de l'étude sur modèle réduit en centrifugation.

5.6.2 - OBSERVATIONS SUR LE SUIVI DES POINTS COLORES

Dans l'ensemble les suivis des points colorés se déroulaient correctement, permettant ainsi de visualiser les trajectoire pour tous les essais. Les deux problèmes suivants méritent cependant d'être signalés:

- parfois certains points subissent de grandes déformations lorsqu'ils entrent dans une zone à vitesse rapide (notamment près de la sortie) et s'étirent en fin filet, provoquant l'arrêt du suivi. L'utilisation de billes colorées pourrait permettre d'éviter ce problème mais il faut vérifier si celles-ci s'écoulent de la même manière que le matériau.
- il arrive aussi que le matériau mouillé laisse des traces sur la feuille de rhodoïd pendant l'écoulement et masque le point à suivre qui, dès lors, est perdu.

5.6.3 - VERIFICATION DE LA REPETITIVITE

Des essais ont été réalisés spécialement pour tester la répétitivité des expériences. La première série comprend deux répétitions tandis que la seconde en contient quatre (tableau 5.3). Ce tableau montre la répétitivité des différents paramètres calculés. Afin de mieux faire apparaître cette répétitivité la valeur du débit a été ramenée à une même vitesse de tapis. La seconde série d'essais donne, pour une vitesse de tapis de 7 m/min, un débit moyen $Q_m = 6.31$ daN/s et un écart type $\sigma_m = 0.07$ daN/s. L'intervalle $[Q_m - \sigma_m, Q_m + \sigma_m]$ contient les quatre valeurs du débit obtenu.

La figure 5.8 représente les trajectoires des points marqués obtenus avec les essais de répétitivité du tableau 5.3. Sans rentrer dans le détail sur les différents aléas qui font que certaines trajectoires ne peuvent être rigoureusement identiques, on peut affirmer que globalement il y a répétitivité du mouvement.

En outre le débit Q_m calculé ci-dessus pour le modèle réduit correspond à un débit massique de 116 t/h (Cf. formule (5.6)) pour le prototype correspondant. Cette valeur peut être déterminée

directement en appliquant la formule connue (Cf. 1.1.2.2.a)

$$Q = \xi \rho g v_t S$$

pour laquelle :

$$\rho \approx 1.4 \text{ t/m}^3 \quad v_t = 7 \text{ m/min}$$

$S = A \times l$ = section (théorique) de matériau sur le tapis

$A = 5 \text{ cm} \times 5$ (hauteur de trappe)

$l = 18 \text{ cm} \times 5$ (épaisseur de la trémie réelle)

En prenant le coefficient de proportionnalité $\xi = 0.9$ alors on trouve $Q = 119 \text{ t/h}$. Ceci confirme une fois de plus la cohérence avec la réalité des résultats obtenus en centrifugeuse.

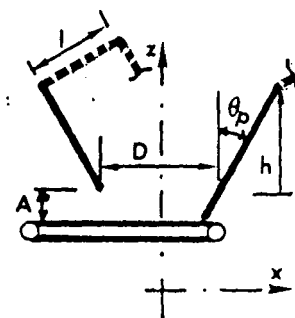
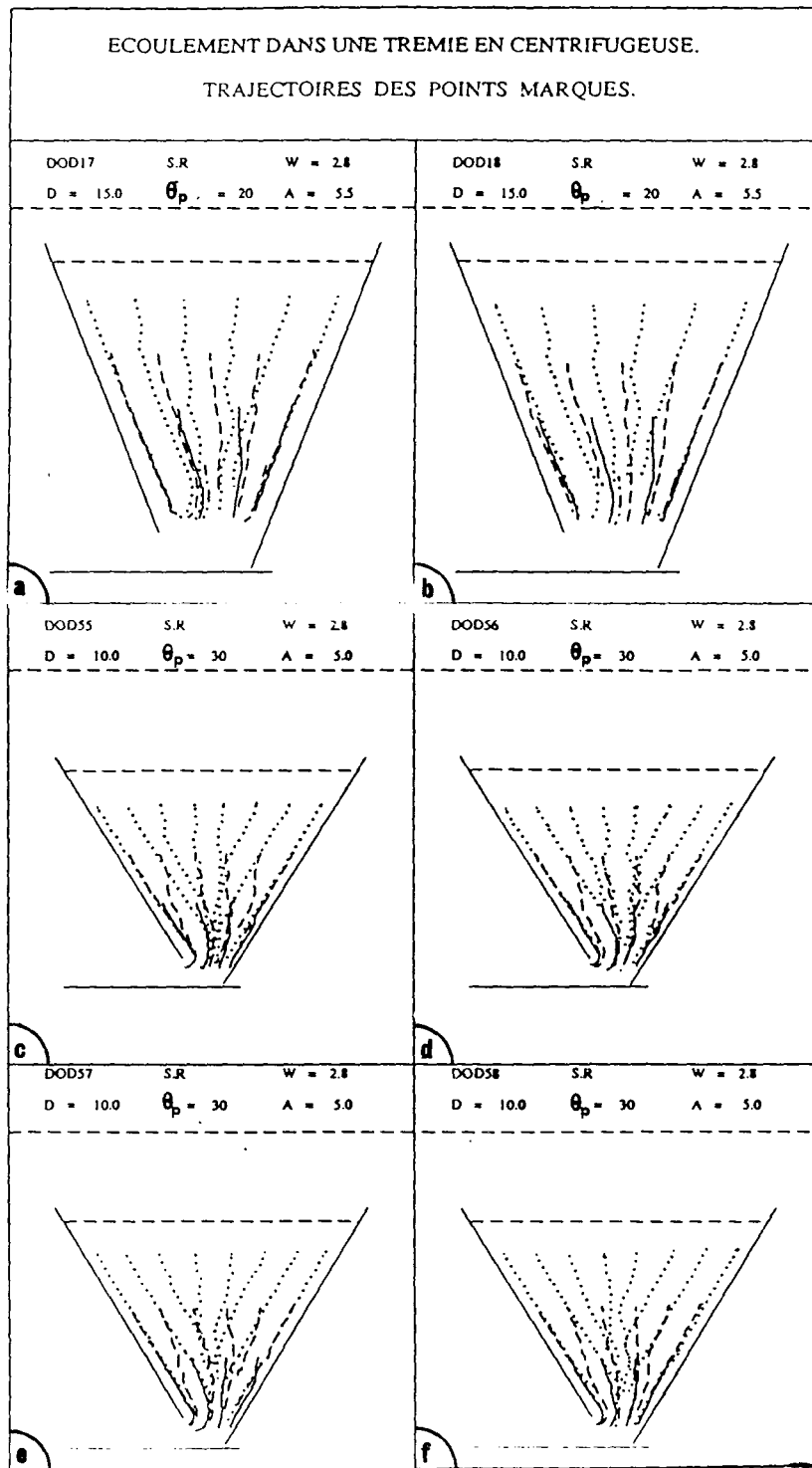
Tableau 5.3 - Vérification de la répétitivité - Matériau : sable roulé de Loire

Nom de l'essai	Poids matériau mesuré (daN)	Poids matériau calculé (daN)	Ecart type (daN)	Vitesse du tapis (m/min)	Ecart type (daN)	Durée de vidange (s)	Débit pondéral (daN/s)	Vitesse tapis de référ. V_o (m/min)	Débit ramené à V_o daN/s
DOD 17		143.20	6.21	8.37	1.46	17.63	8.12	8	7.76
DOD 18		145.89	8.85	8.38	1.26	18.22	8.01		7.65
DOD 55	152	146.45	5.72	6.93	0.74	23.6	6.20	7	6.26
DOD 56	152	147.80	6.00	6.88	0.82	23.7	6.24		6.34
DOD 57	152	145.33	3.88	7.04	0.84	22.5	6.45		6.41
DOD 58	152	147.41	5.01	7.12	0.89	23.2	6.35		6.24

Pour DOD 17 et DOD 18 : $D = 15 \text{ cm}$; $A = 5.5 \text{ cm}$ et $\theta_p = 20^\circ$

Pour DOD 55 à 58 : $D = 10 \text{ cm}$; $A = 5.0 \text{ cm}$ et $\theta_p = 30^\circ$

Figure 5.8 - Vérification de la répétitivité - Matériau : sable roulé de Loire (S.R)



Pour a et b $D = 15 \text{ cm}$; $A = 5.5 \text{ cm}$; $\theta_p = 20^\circ$
 Pour c à f $D = 10 \text{ cm}$; $A = 5.0 \text{ cm}$; $\theta_p = 30^\circ$

5.6.4 - MECANISME DE L'ÉCOULEMENT EN FONCTION DE LA GEOMETRIE

5.6.4.1 - FORMATION DE VOUTE STABLE

Au niveau de l'orifice de sortie la section horizontale de la trémie est rectangulaire de longueur $l = 18$ cm (distance entre les deux parois verticales) et de largeur D . Comme il s'agit d'un écoulement bidimensionnelle, le paramètre l n'influe pas sur le mode d'écoulement. La valeur minimale D_v de D , au-dessous de laquelle l'écoulement ne peut se produire, représente la dimension critique de l'orifice pour la formation de voûte stable. Le tableau 5.4 dresse les valeurs de D_v obtenues avec les inclinaisons θ_p de 30° et 40° pour les deux matériaux utilisés. La détermination de D_v consiste d'abord à trouver une ouverture D à la base suffisamment faible pour empêcher l'écoulement à l'accélération de 5 g. Ensuite, il suffit d'augmenter l'accélération jusqu'à une valeur g_v où la voûte s'écrase et l'écoulement commence. D_v s'écrit alors pour le modèle réduit:

$$D_v = \frac{Dg_v}{5g} \quad (5.10)$$

La figure 5.9 illustre des écoulements ayant lieu après la rupture de la voûte. En début d'écoulement, le point central de chaque rangée de marqueurs ne s'aligne pas avec les autres et se trouve plus bas à cause de l'affaissement du matériau au moment de la rupture de la voûte. Bien que $l (= 18$ cm) soit la plus grande dimension de l'ouverture, elle ne détermine pas la taille de la cheminée à cause de la bidimensionnalité de l'écoulement.

Avec le sable roulé de Loire 0/4 la dimension critique D_v mesure 1 cm sur le modèle réduit (tableau 5.3) soit 5 cm sur le modèle réel ou encore $2,5 d_{\max}$ ($d_{\max}$ = dimension maximale des grains). Cette valeur faible de D_v , inférieure à la valeur conseillée $5 d_{\max}$ (Cf. 1.3.3) pour le dimensionnement vis-à-vis de la voûte géométrique, confirme que ce sable s'écoule bien.

En revanche le sable broyé de Loire forme plus facilement la voûte notamment à teneur en eau élevée (environ 8 %). Pour ce matériau les paramètres qui varient explicitement dans le tableau 5.4 sont l'inclinaison θ_p de la paroi par rapport à la verticale et à la teneur en eau w . Les résultats semblent montrer que :

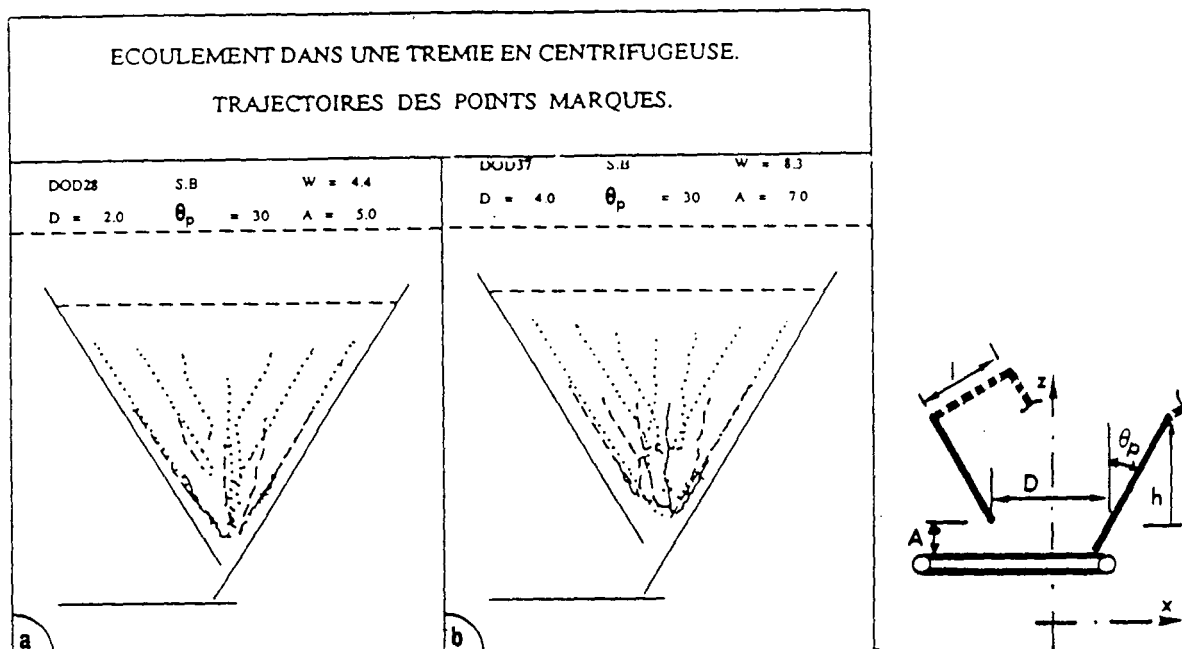
- à faible teneur en eau la variation de celle-ci a plus d'effet sur D_v que celle de θ_p ,
- à teneur en eau élevée la variation de θ_p a plus d'effet sur D_v que celle de w .

Théoriquement ce sont les paramètres θ_p , φ_e (angle de frottement interne effectif) et σ_c (stabilité de la voûte) qui varient.

Si on admet d'après JENIKE [38], que φ_e augmente avec w les résultats de l'approche théorique du chapitre 2 vont dans le sens de la confirmation des deux constatations ci-dessus : la courbe $D_v(\theta_p)$ croît plus vite lorsque φ_e augmente (Cf. fig 2.8.a Chapitre 2).

On montrera aussi au chapitre 6, par l'intermédiaire de notre approche théorique, que la valeur de σ_c croît avec la teneur en eau pour le sable broyé de Loire. Ce paramètre caractérisant l'état de consolidation du matériau croît linéairement avec D_v (Cf fig 2.8.e Chapitre 2) et cette fois encore plus rapidement lorsque φ_e augmente. Finalement les résultats obtenus dans le tableau 5.4 avec le sable broyé de Loire semblent donc a priori normaux.

Figure 5.9 - Ecoulements après la rupture d'une voûte avec le sable broyé de Loire

Tableau 5.4 - Dimension critique D_v à la base de la trémie pour la formation de voûte stable

Nom de l'essai	Matériau	Teneur en eau w (%)	Accélération à la rupture voûte "g"	Inclinaison de la paroi θ_p (°)	D_v modèle réduit (cm)	D_v modèle réel (cm)
DOD 14	Sable roulé de Loire 0/4	3.5	5	40	1	5
DOD 23	Sable broyé de Loire 0/2	4.2	5	40	2	10
DOD 28 DOD 29		4.4	6	30	2.4	12
DOD 37		8.3	6.7	30	5.4	27
DOD 42		7.8	7.3	40	5.8	29

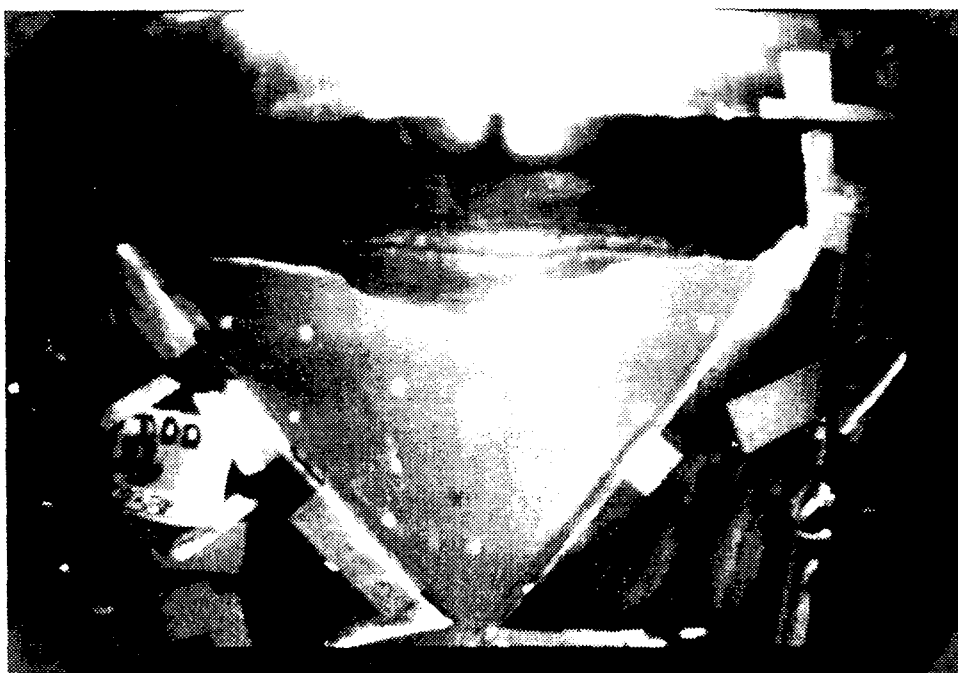
Enfin, lors des essais préliminaires à accélération 1 g on obtenait des valeurs plus grandes de D pour la formation de voûte stable comparativement aux résultats obtenus en centrifugeuse (à 5 g) mais il n'y a pas de méthode pour en déduire D_v . Il s'agit là d'une différence observée entre une étude sur modèle réduit en laboratoire (1 g) et une étude en centrifugeuse (5 g). L'étude sur modèle réduit à 1 g aurait ainsi pour effet de surdimensionner une trémie par surévaluation de la valeur de D_v .

5.6.4.2 - ECOULEMENT PARTIEL - ECOULEMENT EN CHEMINEE

Ecoulement partiel signifie qu'il existe dans la trémie une ou des régions en mouvement et d'autre(s) à l'arrêt. L'écoulement en cheminée en fait partie (photo 5.3).

Avec des angles d'inclinaison de la paroi de 30° et 40° en mode longitudinal, on assiste à une descente alternée entre deux zones, l'une "avant" et l'autre "arrière" en se référant au sens d'évacuation du matériau, qui glissent sur les parois. Comme l'orifice de sortie se trouve sur un côté de la trémie (côté avant) il y a compétition entre les deux régions. La priorité à la sortie revient à celle qui contient le plus de matière. Ainsi il y a alternance car la zone en mouvement se décharge et doit ensuite céder le passage à celle qui est à l'arrêt. Ce phénomène apparaît nettement dans le film. Sur les courbes représentant les coordonnées des points colorés en fonction du temps, il se traduit par une succession d'arrêts (paliers) et de mouvements (fig 5.10.a). Un arrêt (palier) d'un côté de l'axe central correspond à un mouvement de l'autre côté. Le phénomène est beaucoup plus marqué avec le sable roulé de Loire (fig 5.10.a). Il y a donc une certaine liaison avec la granularité du matériau et avec la position et la dimension de la section de passage au niveau de la sortie. L'incidence de la taille des grains, qui n'ont pas été réduits, peut conduire à rectifier certains facteurs d'échelle pour obtenir une valeur correcte du débit [55]. Mais la cohérence des résultats avec ceux obtenus en modèles réels montre que cette incidence est faible pour notre cas.

Photo 5.3 - Ecoulement en cheminée (sable broyé de Loire)



En outre, le phénomène d'alternance est d'autant plus marqué que l'inclinaison de la paroi θ_p par rapport à la verticale est grande (plus avec $\theta_p = 40^\circ$ que 30°). On verra d'ailleurs ci-dessous qu'il s'atténue considérablement pour le cas d'écoulement en masse obtenu avec $\theta_p = 20^\circ$ (fig 5.10.c). Les figures 5.9 et 5.11 montrent que les trajectoires des points marqués sont pratiquement rectilignes et parallèles à la paroi dans les deux zones "avant" et "arrière" décrites plus haut. Entre celles-ci, il existe autour de l'axe central une troisième zone intermédiaire. Il s'agit en fait d'une manifestation de la cheminée qui évolue en fonction de la taille de l'ouverture à la base D de la trémie :

- pour de faibles valeurs de D (< 10 cm) cette zone intermédiaire suit les mouvements alternés des deux autres zones. Par conséquent les points colorés y décrivent des trajectoires quelque peu en zigzag (fig 5.11 a) à l'exception parfois des grains situés sur l'axe central qui descendent directement vers la sortie (fig 5.9 a),

- lorsque D augmente les trajectoires des points colorés deviennent de plus en plus rectilignes et verticales au sein de cette zone intermédiaire, matérialisant ainsi la cheminée (fig 5.11.b). Celle-ci est d'autant plus nette et persistante que le matériau s'écoule plus difficilement (sable broyé de Loire 0/2) ou que l'angle d'inclinaison de la paroi θ_p est grand ($\theta_p = 40^\circ$). La figure 5.11.b établit une comparaison des formations de cheminée obtenues avec $\theta_p = 30^\circ$ et $\theta_p = 40^\circ$. Lorsque θ_p diminue les parois se rapprochent des frontières de la cheminée qui deviennent de moins en moins nettes puisque le matériau tend à s'écouler en masse. De part et d'autre de la cheminée les deux zones "avant et arrière" glissent toujours l'une après l'autre et parallèlement à la paroi. La figure 5.10 illustre bien une formation de cheminée : si au début de l'écoulement les grains situés dans la région centrale s'écoulent déjà (points n° 4, 5 et 6), ceux situés au voisinage des parois sont encore immobiles (points n° 1, 2, 3, 7, 8 et 9).

5.6.4.3 - ECOULEMENT EN MASSE

Pour les deux matériaux utilisés l'écoulement en masse se produisait avec une trémie dont les parois s'inclinent de $\theta_p = 20^\circ$ par rapport à la verticale et d'ouverture $D \geq 10$ cm à la base.

Quelques configurations obtenues en prenant $\theta_p = 30^\circ$ (fig 5.11.c) et $\theta_p = 40^\circ$ entretenaient aussi un mouvement d'ensemble bien que pour ces deux valeurs de θ_p l'écoulement alterné et la formation de cheminée aient été les plus fréquents.

A - ANALYSE DES DEPLACEMENTS DES POINTS COLORES

Les représentations des coordonnées des marqueurs en fonction du temps (fig 5.10.c) montrent bien le mouvement sans interruption de l'ensemble du début à la fin de la vidange. Malgré ce mouvement d'ensemble, les trajectoires (fig 5.8 a, b et 5.11 c) des grains contenus dans une zone centrale de la trémie comportent des ondulations, comme dans le cas de l'écoulement alterné décrit plus haut, à cause des mouvements de glissement sur les parois. C'est en effet dans cette zone que le matériau doit s'arranger pour converger vers la sortie. Le phénomène apparaît beaucoup moins en

mode transversal pour lequel l'évacuation du matériau s'effectue perpendiculairement au plan de la trémie (fig 5.11 c). Cette fois la sortie est symétrique. La symétrie de l'écoulement se dessine de plus en plus en mode transversal, sans être tout à fait complète. La comparaison avec les trajectoires en écoulement de cheminée montre que plus l'angle θ_p de la paroi avec la verticale diminue, mieux l'hypothèse d'écoulement radial est vérifiée.

B - ANALYSE DE LA DISTRIBUTION DE VITESSE

La connaissance des positions des points marqués en fonction du temps permet d'établir la distribution de vitesse dans la trémie à tout moment de la vidange, en faisant une interpolation. Cette dernière s'effectue seulement dans une région rectangulaire où les points colorés étaient localisés à l'instant choisi hormis les zones qui se trouvent en dehors de la trémie (cf fig 5.12 et 5.13). Les points extrêmes délimitent le rectangle ainsi sur les représentations graphiques une partie (supérieure) de la paroi n'apparaît pas dans le cadre. Il résulte de cette méthode une représentation des lignes iso-vitesses dans la trémie. Au début de l'écoulement l'interpolation concerne la totalité des points colorés soit environ une quinzaine. Puis quand la vidange évolue certains points disparaissent. Finalement il y a peu de points à interpoler et il faut attacher plus d'importance aux valeurs des vitesses calculées qu'aux allures des iso-modules de vitesse. Il faudrait multiplier davantage le nombre de points colorés pour bien préciser celles-ci.

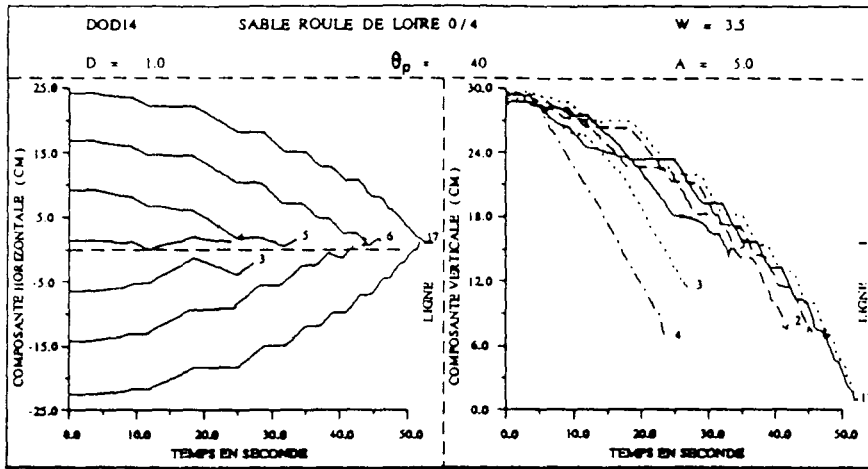
La distribution de vitesse en mode longitudinal, établie pour le sable roulé de Loire (fig 5.12) montre que malgré le mouvement d'ensemble, il existe un côté préférentiel de l'écoulement dans la trémie. Ce côté se situe tantôt à l'arrière (fig 5.12.a) tantôt à l'avant (fig 5.12.b). Il s'agit là d'une forme plus évoluée du phénomène de priorité à la sortie discuté plus haut et dû à l'emplacement de l'orifice d'évacuation. Cela engendre une absence de symétrie du profil de vitesse.

En mode transversal la distribution de vitesse évolue également pendant la vidange (fig 5.13) mais beaucoup plus régulièrement et sans côté préférentiel puisque l'extraction s'effectue symétriquement. En dépit des variations incessantes de la distribution des vitesses les valeurs de celles-ci évoluent autour d'un certain ordre de grandeur ce qui justifie la constance du débit d'écoulement. On montrera au chapitre 6 que cet ordre de grandeur correspond à la prévision théorique établie pour un écoulement permanent connaissant le débit.

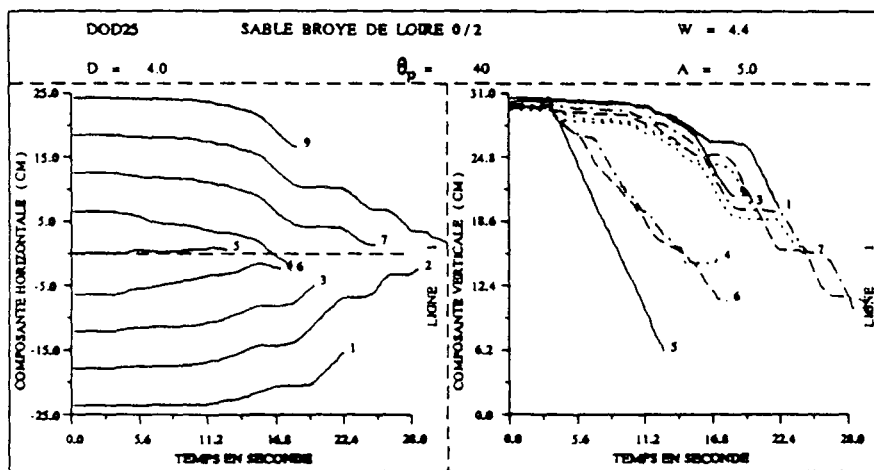
5.6.5 - LINEARITE DU DEBIT AVEC L'EPAISSEUR DE VEINE DE MATERIAU

Deux essais ont été répétés avec une valeur plus faible de l'ouverture de la trappe A. Les résultats présentés au tableau 5.5 montrent que lorsque A diminue de 5 cm à 3 cm, soit de 40 %, le débit diminue respectivement de 37 % et 38 % pour les deux cas (donc presque de 40 %). Le débit varie donc linéairement avec l'ouverture de la trappe qui détermine également l'épaisseur de veine de matériau sur le tapis doseur. On vient de confirmer de nouveau un résultat connu pour des trémies doseuses grandeurs nature à partir d'essais effectués en centrifugeuse (Cf. 1.1.2.2.a).

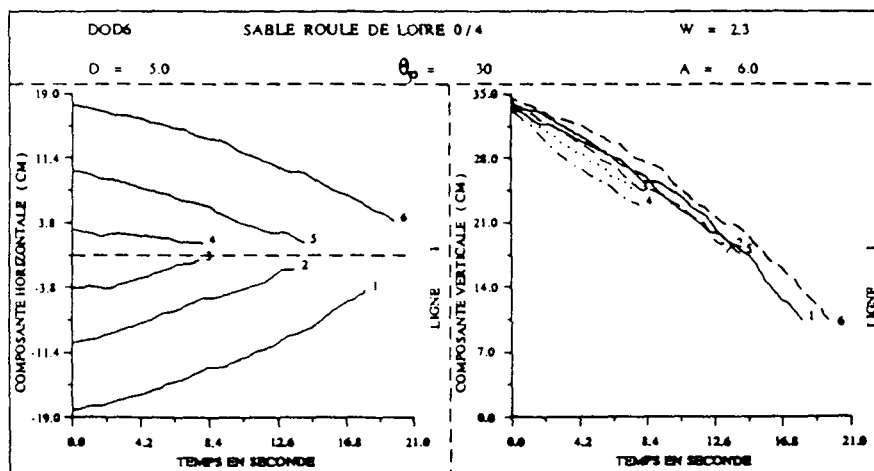
Figures 5.10 - Evolution dans le temps des coordonnées des marqueurs pendant l'écoulement



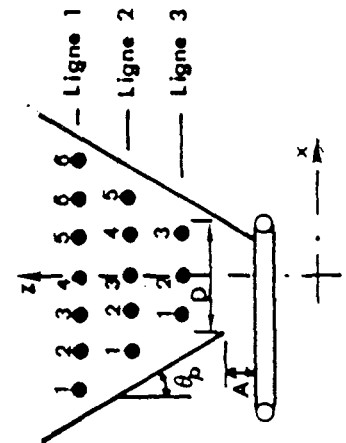
a) Ecoulement alterné



b) Ecoulement en cheminée

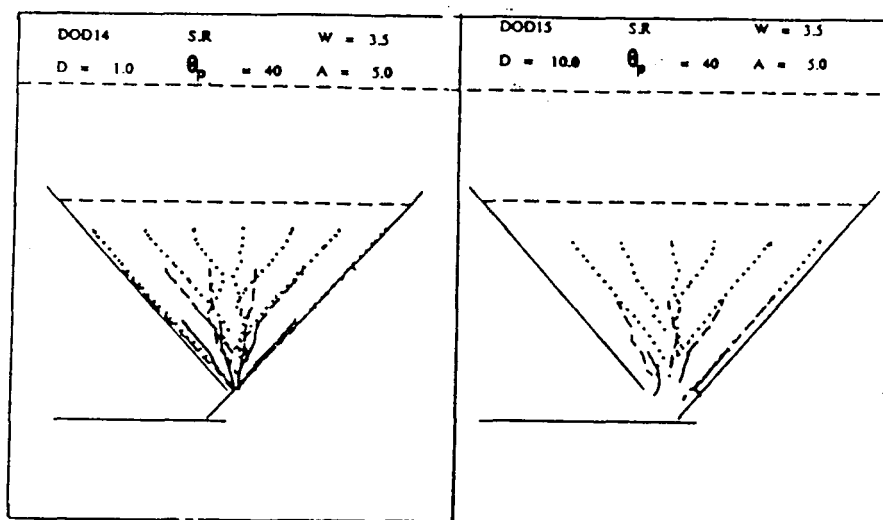


c) Ecoulement en masse

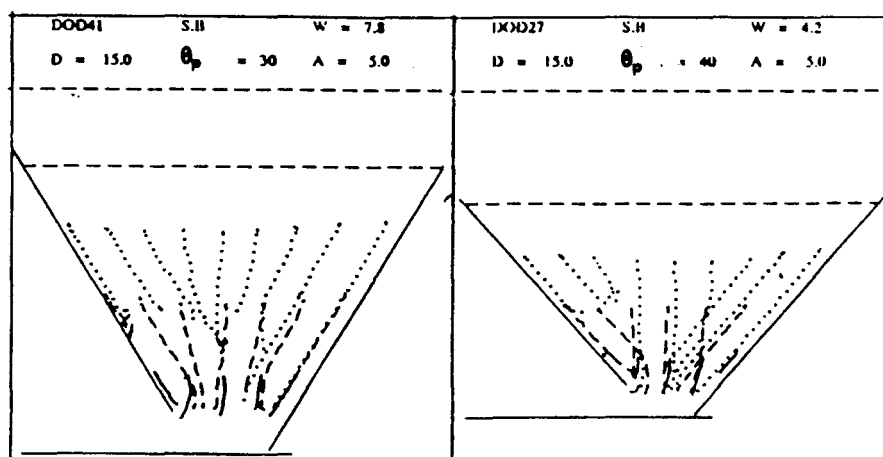


Sens de numérotation des
lignes et des points colorés

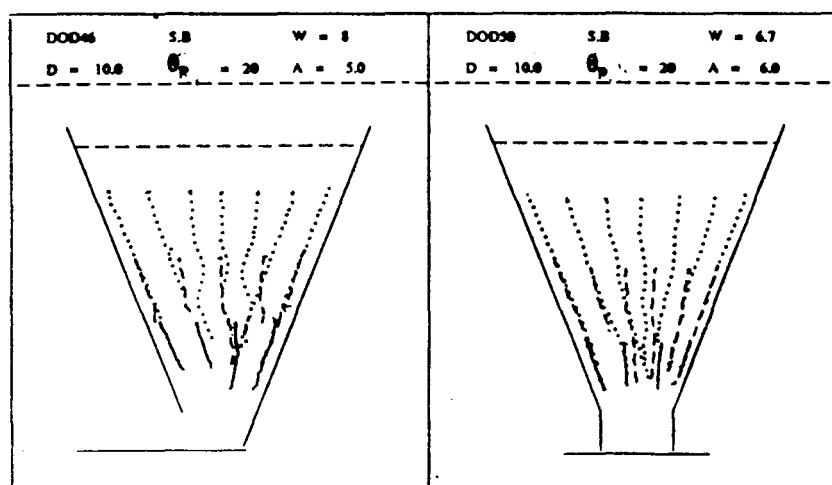
Figure 5.11 - Trajectoires des marqueurs pendant l'écoulement alterné et l'écoulement en cheminée



a) Ecoulement alterné



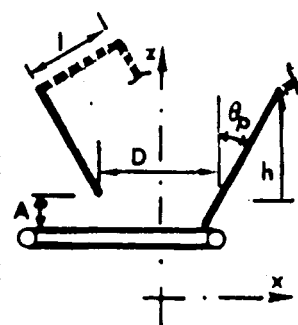
b) Ecoulement en cheminée



Mode Longitudinal

Mode transversal

c) Ecoulement en masse



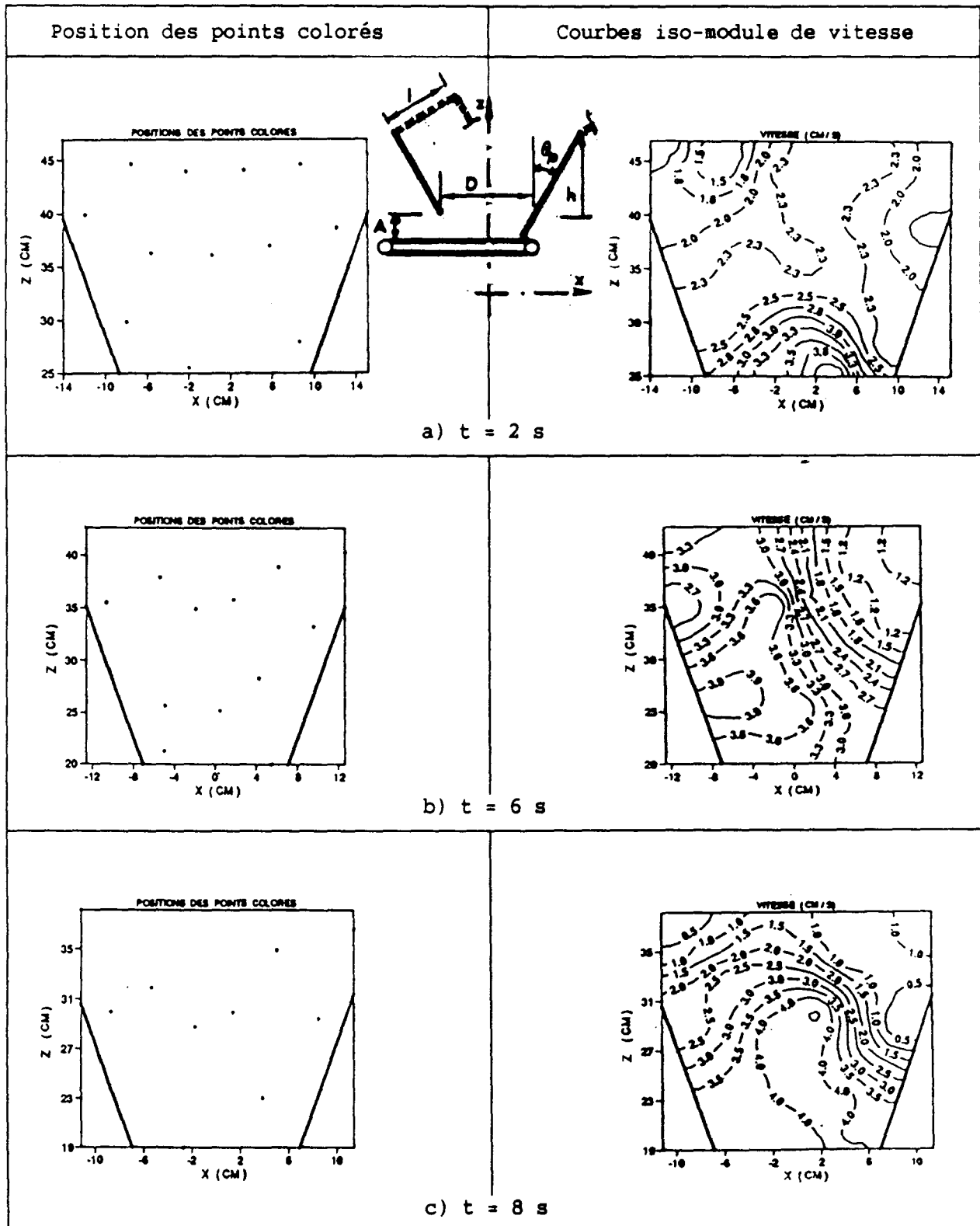


Figure 5.13 - Distribution de vitesse en mode transversal pendant l'écoulement en masse (sable roulé de Loire)

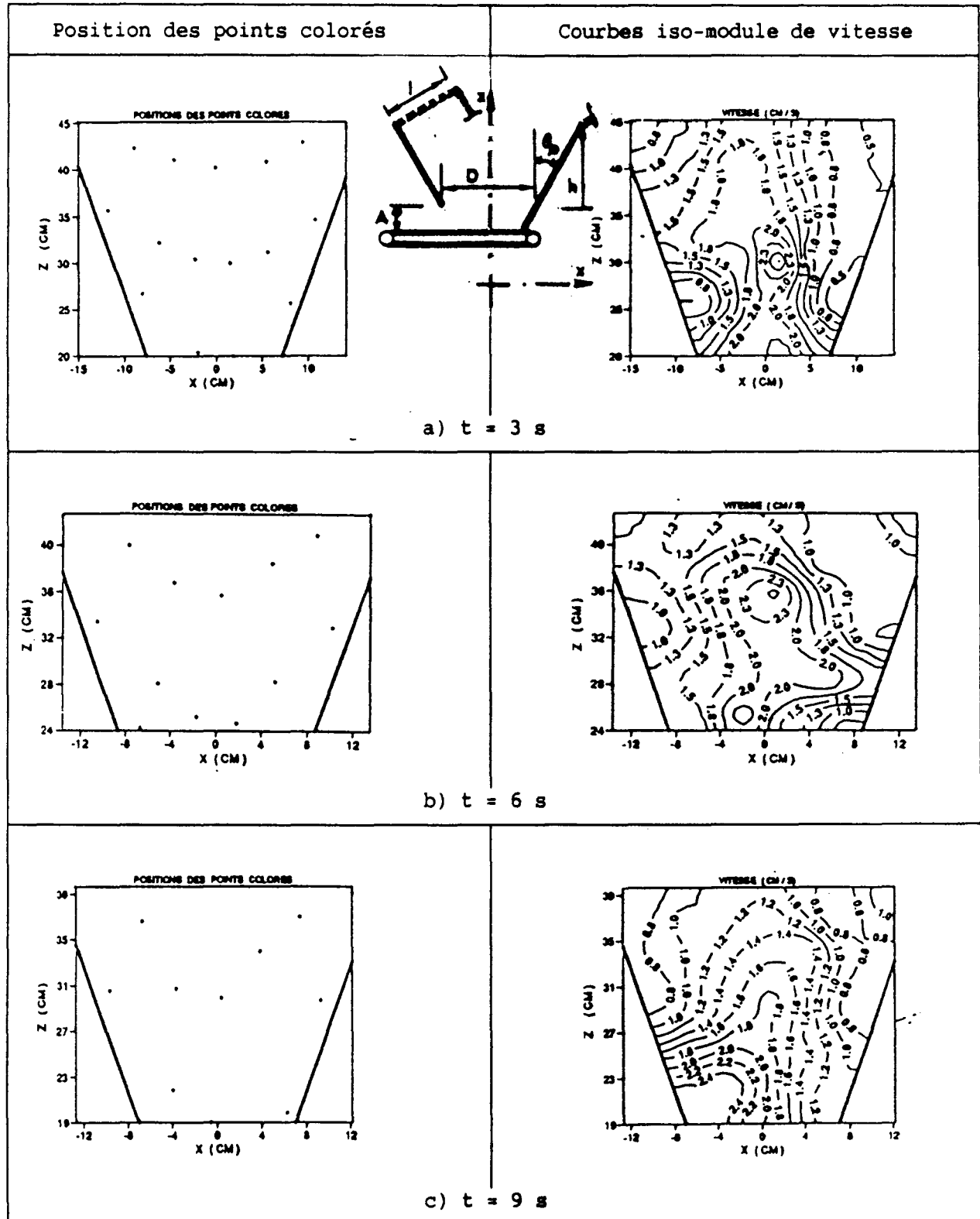


Tableau 5.5 - variation du débit en fonction de l'ouverture de la trappe

Nom de l'essai	D (cm)	θ_p (°)	A (cm)	Débit (daN/s) pour $v_t=9$ m/min
DOD 35	10	30	5	7.85
DOD 36			3	4.91
DOD 45		20	5	7.04
DOD 46			3	4.34

5.6.6 - SYNTHESE

L'étude de l'écoulement granulaire dans un modèle réduit à géométrie variable en centrifugeuse a été une tentative dont le bilan semble tout à fait positif.

Les résultats des tests de répétitivité mettent en confiance en ce qui concerne les techniques de mesure du débit, de la vitesse du tapis et du temps de vidange ainsi que de la technique d'analyse d'image. Les valeurs du débit obtenues avec les différents essais correspondent, en ordre de grandeur, aux estimations établies à partir de résultats d'essais en modèles réels pour concevoir le modèle réduit. Elles vérifient la relation usuelle qui lie proportionnellement le débit volumétrique, la vitesse du tapis et la section utile de matériau sur le tapis doseur. Il convient aussi de signaler la grande précision de la technique de suivi de point. En effet les différentes distributions de vitesse présentées plus haut ont été obtenues à partir des déplacements des points marqués enregistrés pendant une durée relativement brève de 160 ms. L'étude en centrifugeuse présente donc un avantage considérable car elle permet de s'affranchir d'expérimentations lourdes à réaliser avec des trémies réelles. Quelques améliorations méritent cependant d'être apportées pour les essais futurs, notamment :

- l'adaptation du support de la trémie en un système à trois pieds stables. Sinon il faut une acquisition plus rapide pour améliorer la précision de calcul (débit, vitesse du tapis, durée de vidange),
- l'utilisation de points colorés peu déformables pour pouvoir les suivre jusqu'à la base de la trémie.

Les résultats des essais en centrifugeuse permettent de décrire le mécanisme de l'écoulement suivant la géométrie de la trémie :

A - Pour une inclinaison θ_p donnée de la paroi il existe une valeur critique D_v , de la dimension à la base, au-dessous de laquelle une voûte se maintient. D_v est faible pour le sable roulé de Loire. Elle semble correspondre à la section de passage minimale qui laisse les grains s'écouler. Autrement dit le sable roulé de Loire ne forme pas de voûte de type "cohésif" et s'écoule donc librement. En revanche le sable broyé de Loire forme plus facilement la voûte notamment à forte teneur en eau pour laquelle les valeurs de D_v obtenues approchent les 30 cm sur un modèle réel. On confirme donc les résultats obtenus aux chapitres 3 et 4 à propos de l'effet manifeste de la teneur en eau sur

l'écoulement de ce matériau avec fines. En effet son aptitude à se consolider, donc à développer une stabilité σ_c , augmente lorsque l'humidité est élevée ($w = 8\%$). Ceci explique aussi d'une façon indirecte l'effet constaté de l'inclinaison θ_p de la paroi car suivant ses valeurs la charge qui compacte le matériau à la base de la trémie varie.

B - Lorsque l'écoulement se produit sa forme dépend de la configuration de la trémie :

- La position excentrée de l'orifice d'évacuation en mode longitudinal crée dans le processus de l'écoulement un phénomène d'alternance entre une zone "avant" et une zone "arrière". Ce phénomène se manifeste davantage avec le matériau de plus grande taille maximale (le sable roulé de Loire 0/4) et avec de faibles valeurs de la dimension D à la base de la trémie ou de l'angle d'inclinaison θ_p de la paroi par rapport à la verticale. Ainsi il se trouve nettement atténué pendant l'écoulement en masse (θ_p faible et D suffisamment grand) et n'apparaît pas en mode transversal pour lequel l'extraction s'effectue symétriquement.

- Lorsque θ_p est grand ($= 40^\circ$) il existe une zone centrale intermédiaire aux deux zones "avant" et "arrière" signalées ci-dessus. Il s'agit en quelque sorte d'une manifestation de la cheminée. Car lorsque l'ouverture D augmente suffisamment, cette cheminée se matérialise davantage notamment avec le sable broyé de Loire à forte teneur en eau. Ainsi la taille de la cheminée initiale dépend de la valeur de D. Dans le cas des trémies réelles (chap 4) il s'agit de la plus grande dimension de l'ouverture.

Si à partir d'une configuration de la paroi, qui montre la formation de cheminée ($\theta_p = 40^\circ$), on diminue l'angle d'inclinaison par rapport à la verticale θ_p de la paroi, les frontières de cette cheminée deviennent de moins en moins nettes jusqu'à ce que l'écoulement en masse se développe (obtenu pour tous les essais effectués avec $\theta_p = 20^\circ$ et $D \geq 10$ cm). En même temps les trajectoires des points colorés situés sur la partie centrale de la cheminée s'inclinent de plus en plus de la verticale. Ainsi l'hypothèse d'écoulement radial semble d'autant mieux vérifiée que θ_p est petit.

- A la base de la trémie en mode longitudinal les grains s'orientent vers l'orifice de sortie provoquant ainsi une dissymétrie dans la forme de l'écoulement. Une certaine dissymétrie est également constatée dans la région centrale de la trémie même en mode transversal (sortie symétrique), zone où s'arrangent les grains pour converger vers la sortie.

C - La position excentrée de l'orifice crée également au niveau de la distribution de vitesse un côté préférentiel de l'écoulement (de plus grande vitesse) qui s'alterne entre l'avant et l'arrière notamment avec le sable roulé de Loire. Ce phénomène disparaît en mode transversal pourtant la distribution de vitesse ne cesse d'évoluer pendant la vidange. Cela semble indiquer l'absence d'une phase stable de la distribution de vitesse durant cette dernière. Cependant les vitesses varient peu en intensité ou du moins il se produit une sorte de compensation entre les différentes régions en mouvement. Par conséquent le débit se conserve. Pour être plus précis dans l'étude de la distribution de vitesse notamment du point de vue profil il faudrait augmenter le nombre de points colorés à suivre.

CHAPITRE 6

ANALYSE GENERALE

CHOIX DE LA GEOMETRIE D'UNE TREMIE DE DOSAGE

Il s'agit dans ce chapitre de relever les éléments importants qui permettent d'établir des comparaisons entre les différentes études abordées dans les cinq chapitres précédents. L'approche théorique mise au point au chapitre 2 se trouve ainsi validée, des règles de choix de la géométrie du matériel de dosage peuvent alors être établies à partir de ce modèle. Elles sont à prendre en compte moyennant les critiques issues des confrontations.

6.1 - CONFRONTATION DES ETUDES BIBLIOGRAPHIQUE, THEORIQUE ET EXPERIMENTALE

6.1.1 - COMPORTEMENT DES MATERIAUX PENDANT L'ECOULEMENT

L'approche théorique de l'écoulement établie au chapitre 2 utilise certaines hypothèses issues de la loi d'écoulement non associée (Cf 1.2.1.1.3). En particulier elle reconnaît l'existence d'une phase initiale d'écoulement durant laquelle le matériau se dilate pour acquérir une masse volumique optimale qui se maintient pendant l'écoulement. Les enregistrements de la densité apparente effectués à la base d'une trémie réelle mettent bien en évidence cette phase initiale d'écoulement (Cf 4.5.2.1). Ils montrent aussi que lorsque l'écoulement se produit facilement il vient à la suite de cette dernière une phase établie pendant laquelle la densité apparente reste pratiquement constante. En revanche, pour les écoulements difficiles (cas obtenus avec les sables avec fines à teneur en eau élevée et les cendres volantes), la densité apparente fluctue beaucoup durant la vidange autrement dit elle ne peut se stabiliser. Ainsi l'hypothèse d'incompressibilité adoptée dans la mise au point du modèle théorique n'est donc valable que pour un écoulement sans problème. Ceci justifie notre démarche de considérer d'abord le cas d'un écoulement facile (en masse) pour la formulation des problèmes avant d'introduire le cas de blocage partiel ou total de l'écoulement.

Il relève tout particulièrement de l'analyse des caractéristiques des matériaux effectuée au chapitre 3 la liaison étroite entre leur teneur en eau et leur teneur en fines pour développer une cohésion sous un certain degré de consolidation (masse volumique apparente). Les deux sables étudiés diffèrent surtout à forte consolidation : si le sable roulé de Loire ne tasse plus, le sable broyé de Loire continue à gagner de la résistance. Cette étude reflète les comportements à l'écoulement des deux matériaux bien que la cohésion mise en cause pendant l'écoulement soit faible par rapport à celle déterminée avec l'essai triaxial. En effet la formule approximative (1.18) du chapitre 1 montre qu'une faible cohésion c dans le matériau peut engendrer une stabilité σ_c au moins deux fois plus grande.

Les études menées au chapitre 5 (Cf 5.6.4.1), avec ces deux matériaux, pour déterminer la dimension critique D_v confirment ce résultat. Une estimation de la valeur σ_c correspondant à chaque cas de voûte stable obtenu, à partir de l'approche théorique, est présentée dans le tableau 6.2 ci-dessous. On constate que la stabilité du matériau augmente avec la teneur en eau pour le sable broyé de Loire tandis que le sable roulé de Loire ne forme pratiquement pas de voûte de type "cohésif".

L'approche de la frontière initiale de la cheminée au chapitre 2 a montré que la taille de celle-ci au début de l'écoulement est plus large avec un matériau à écoulement facile qu'avec un matériau à écoulement difficile. Les expérimentations réalisées semblent confirmer ce résultat :

- avec les modèles de trémie réelle la taille de la cheminée initiale obtenue dépend de la difficulté d'écoulement du matériau

- avec le modèle réduit les cheminées les plus visibles et persistantes ont été obtenues avec le sable broyé de Loire à teneur en eau élevée, un matériau difficile.

6.1.2 - PREDICTION THEORIQUE DES DIMENSIONS D'UNE TREMIE SUIVANT LE MODE D'ÉCOULEMENT

Dans la partie 1.3.3 du chapitre 1 ont été présentées et discutées quelques méthodes théoriques pour le calcul de la dimension critique D_m à la base d'une trémie. Pour celles-ci D_m détermine la limite entre l'écoulement en masse et la formation de voûte stable. L'expression la plus simple de D_m est proposée par JENIKE. Elle contient un facteur qui introduit :

- l'angle de frottement interne φ pour GARDNER et RICHMOND
- l'angle de frottement à la paroi φ_p et l'angle d'inclinaison θ_p de celle-ci pour WALKER
- φ et θ_p pour LENCZNER
- θ_p et φ_p et l'angle de frottement interne effectif φ_e pour ENSTAD

Dans l'élaboration du modèle théorique au chapitre 2 nous avons considéré qu'entre une formation de voûte stable et un écoulement en masse il peut se produire un écoulement en cheminée. Cela donne lieu à la définition de deux dimensions critiques à la base d'une trémie, l'une pour la formation de voûte stable (D_v) et l'autre pour l'écoulement en masse (D_m) :

- D_v dépend de θ_p et de φ_e mais pas de l'angle de frottement à la paroi φ_p . Ceci peut bien s'expliquer pour le cas d'une trémie. En effet, quel que soit l'aspect de la paroi (lisse ou non) une voûte rigide formée dans une trémie ne peut s'écouler que si elle s'écrase. Par contre dans un tube vertical une voûte, bien que rigide, peut glisser si les parois sont suffisamment lisses. L'existence de D_v peut s'expliquer de la manière suivante : pour un matériau de granularité donnée il existe une dimension minimale D_g de l'orifice au-dessous de laquelle il se forme une voûte stable de type "géométrique" (Cf 1.3.3). Si de plus ce matériau possède une cohésion il existe une dimension minimale D_v de l'orifice au-dessous de laquelle il se produit une voûte stable de type "cohésif".

- D_m dépend de φ_p , φ_e et θ_p comme le modèle d'ENSTAD.

Le tableau 6.1 dresse les prédictions des différentes méthodes évoquées ci-dessus pour les mêmes matériaux à l'exception de celle d'ENSTAD qui nécessite la connaissance des fonctions d'écoulement de ceux-ci. Normalement l'angle de frottement interne φ et l'angle de frottement interne effectif φ_e sont différents. φ correspondrait à l'angle de frottement interne initial φ_i défini au 1.2.2.1-b, pour un lieu d'écoulement initial linéarisé, donc $\varphi \leq \varphi_e$. Faute de résultat concret qui permet de préciser les valeurs de ces deux paramètres nous leur attribuons les mêmes valeurs pour constituer le tableau 6.1.

En prenant la méthode de JENIKE, la plus simple et la plus connue, comme référence on constate que GARDNER, RICHMOND et LENCZNER surestiment les valeurs de la dimension critique D_m . Dans la littérature, certains auteurs dont ENSTAD formulaient que la méthode de JENIKE conduit souvent à un surdimensionnement dans la pratique. ENSTAD explique cela par le fait que JENIKE ne prend pas en compte le poids de matériau situé au dessus de la voûte dans l'étude de celle-ci. La méthode que propose ENSTAD par la suite donne des résultats certes inférieurs à ceux de JENIKE mais peu différents. Le modèle de WALKER donne les mêmes résultats que celui de JENIKE sauf pour les trémies à parois lisses et suffisamment escarpées. Pour ce dernier cas WALKER prévoit de faibles valeurs de D_m qui peut s'annuler lorsque $\theta_p = \varphi_p = 0$.

La méthode que nous proposons au chapitre 2 :

- peut prédire des valeurs aussi bien plus faibles que plus fortes de D_m , comparativement aux prédictions de JENIKE, suivant les caractéristiques de la paroi et du matériau. Pour une paroi verticale elle fournit de faibles valeurs de D_m même avec des matériaux difficiles sans que celles-ci s'annulent pour autant. Pour une paroi de pente faible ($\theta_p = 30^\circ$ par exemple) elle donne des valeurs de D_m inférieures aux prédictions de JENIKE avec un matériau de faible φ_e et supérieures à celles-ci avec un matériau plus difficile ($\varphi_e = 50^\circ$). Les résultats auraient aussi évolué si on variait l'angle de frottement à la paroi φ_p . A présent il n'est pas étonnant si la méthode de JENIKE surestime souvent la valeur de D_m car elle reste indifférente vis-à-vis des valeurs de φ_p , φ_e et θ_p . Comme WALKER, la valeur de D_m tend vers 0 lorsque $\theta_p = \varphi_p = 0$. Ceci paraît normal car dans un tube vertical à paroi lisse ($\varphi_p = 0$) un matériau peut s'écouler en mouvement rigide. Cependant il ne faut pas oublier qu'il existe une section de passage minimale D_g (Cf. 1.3.3 formule 1.11) due à la granularité du matériau mais qui n'est pas prise en compte dans le calcul de D_m . Dans ce cas il convient de prendre $D_m = D_g$ pour un tube vertical à paroi lisse.

- permet de déterminer une dimension minimale D_v de l'orifice pour la formation de voûte stable. D_v est inférieur à D_m . L'existence de D_v signifie que l'absence d'écoulement en masse dans une trémie n'entraîne pas forcément une formation de voûte stable. Le tableau 6.1 montre cependant que D_v tend vers 0 lorsque la paroi devient verticale même si celle-ci est très rugueuse. Cela provient du fait que D_v ne dépend pas de l'angle de frottement à la paroi φ_p comme on l'a remarqué ci-dessus. Ainsi notre méthode semble trop optimiste en ce qui concerne la prédiction de D_v pour un tube vertical. Nous proposons de prendre au moins $D_v = D_g$ lorsque $\theta_p = 0$.

Pour conclure cette partie, une nouvelle méthode de prédiction des géométries critiques d'une trémie a été mise au point. Elle peut bien servir d'alternative aux différentes méthodes présentées plus haut. En effet elle semble tout à fait sensible à l'évolution des paramètres du matériau et de la trémie :

- optimiste lorsque la situation peut favoriser un écoulement facile ($\varphi_p = 0$, ou $\theta_p = 0$ ou φ_e faible).
- sévère lorsque la situation ne peut pas favoriser un écoulement facile (φ_p grand ou θ_p grand ou φ_e grand).

Une comparaison avec les dimensions minimales D_v obtenues en centrifugeuse peut déjà être faite même si certains paramètres ne sont pas connus. On confirme ainsi le caractère plus proche de la réalité des prédictions de notre méthode de calcul.

6.1.3 - MECANISME DE L'ÉCOULEMENT SUIVANT LA GEOMETRIE DE LA TREMIE

Dans la mise au point de l'approche théorique présentée au chapitre 2 la formation d'une cheminée a été considérée comme une situation intermédiaire entre la formation de voûte stable et un écoulement en masse. Ces trois phénomènes constituent donc les aspects d'un même phénomène de base qui évolue en fonction de la géométrie du matériel et des caractéristiques du produit. Ainsi l'étude de ces trois modes d'écoulement s'appuie sur la même formulation, à la différence avec certains auteurs qui étudiaient par exemple la formation de voûte stable séparément de l'écoulement en masse [52, 91]. L'étude en centrifugeuse montre qu'effectivement la géométrie de la trémie définit le mode d'écoulement du matériau. Une ouverture d'évacuation trop petite entraîne une formation de voûte stable. Des parois d'inclinaison θ_p (par rapport à la verticale) suffisamment grandes occasionnent une cheminée proche de la verticale.

Si à partir d'une dimension de l'orifice D suffisante on diminue progressivement θ_p alors la cheminée s'approche davantage des parois et devient de moins en moins nette jusqu'à ce qu'elle rencontre celles-ci. A ce moment il se produit un écoulement en masse. En outre, le phénomène d'alternance observé avec la trémie en mode longitudinal est dû à la position excentrée de l'orifice d'évacuation donc à la géométrie de la trémie.

Tableau 6.1 - Dimensions critiques à la base d'une trémie selon différentes méthodes de calcul

matériau : $\rho g = 9 \text{ kN/m}^3$; $\sigma_c = 5 \text{ kPa}$; $\phi_p = 10^\circ$; $h = 2 \text{ m}$

Dimension critique	Auteur	Formule	φ e ou $\tau(^{\circ})$	Ecoulement plan		Symétrie axiale	
				$\theta_p = 0$	$\theta_p = 30$	$\theta_p = 0$	$\theta_p = 30$
Ecoulement en masse D_m (m)	JENIKE	(1.12)	30	0.56	0.56	1.12	1.12
			50	0.56	0.56	1.12	1.12
	WALKER	(1.13)	30	0.19	0.55	0.38	1.10
			50	0.19	0.55	0.38	1.10
	GARDNER	(1.15)	30	1.16	1.16		
			50	1.36	1.36		
	RICHMOND	(1.16)	30	0.96	0.96	1.92	1.92
			50	1.53	1.53	3.06	3.06
	LENCZNER	(1.17)	30	0.56	0.77	1.12	1.50
			50	0.56	1.09	1.12	2.13
	LE PRESENT TRAVAIL	(2.48)	30	0.14	0.33	0.23	0.78
			50	0.17	0.66	0.26	1.31
Voûte D_v (m)	LE PRESENT TRAVAIL	(2.47)	30	0.00	0.15	0.00	0.42
			50	0.00	0.36	0.00	0.79
	ESSAIS EN CENTRIFUGEUSE		$w = 4,4 \%$		0.12	---	
			$w = 8,3 \%$		0.27		

L'approche théorique établie au chapitre 2 utilise l'hypothèse d'un champ de vitesse radiale pendant

L'approche théorique établie au chapitre 2 utilise l'hypothèse d'un champ de vitesse radiale pendant l'écoulement en masse. Les représentations des trajectoires des traceurs colorés (essais en centrifugeuse) indiquent que plus l'inclinaison θ_p de la paroi par rapport à la verticale est faible mieux cette hypothèse est vérifiée.

Pendant les expérimentations en centrifugeuse, quelques configurations du modèle réduit entretenaient une voûte stable. Les dimensions minimales D_v de l'orifice au-dessus desquelles l'écoulement se produit ont été déterminées en agissant sur l'accélération artificielle. Faute de matériel approprié pour déterminer les paramètres φ_e , φ_p et σ_c on ne peut pas déterminer les valeurs théoriques de D_v correspondant aux valeurs expérimentales. Mais pour tester globalement les caractères du modèle nous estimons que $\varphi_e = 40^\circ$ et $\varphi_p = 20^\circ$ et nous adoptons la démarche suivante :

- calculer la stabilité de σ_c du matériau pour chaque cas de voûte stable en considérant que celle-ci est de type cohésif puis situer les valeurs obtenues par rapport à celles rencontrées dans la littérature.
- calculer ensuite la dimension critique D_m permettant d'avoir l'écoulement en masse dans la trémie (connaissant σ_c) puis de voir les modes d'écoulement obtenus avec une dimension $D > D_m$ ou $D < D_m$ en utilisant les enregistrements vidéos.

Les résultats figurent dans le tableau 6.2. La valeur de σ_c augmente avec la teneur en eau pour le sable broyé de Loire. Elle reste en-deçà de 10 kPa comme c'est généralement le cas rencontré dans la littérature pour une trémie de taille normale.

Le tableau 6.2 montre qu'avec une inclinaison $\theta_p = 40^\circ$ de la paroi le phénomène d'alternance, dû à l'emplacement excentré de l'orifice d'évacuation, prédomine pour le sable roulé de Loire et le sable broyé de Loire à faible teneur en eau ($w = 4,2\%$). Cela nous laisse quelque peu indécis dans la comparaison car cette modification du mode d'écoulement dû à la géométrie de la trémie n'entre pas dans la prédiction théorique. Normalement, ces deux matériaux (sable roulé et sable broyé à faible teneur en eau) s'écoulent facilement ainsi les glissements nets des deux blocs en alternance sur les parois laissent supposer qu'il se produirait un écoulement en masse avec une ouverture centrée mais ce pronostic doit être vérifié ultérieurement. Avec le sable broyé de Loire à teneur en eau élevée ($w = 7,8\%$) le phénomène de cheminée devient plus prépondérant que le phénomène d'alternance. Ainsi l'écoulement en cheminée a été obtenu avec une dimension à la base $D < D_m$ (D_m calculé avec $\varphi_e = 40^\circ$ et $\varphi_p = 20^\circ$).

Avec une dimension à la base D suffisante, le phénomène d'alternance semble s'atténuer lorsque θ_p diminue pour laisser place à un écoulement en masse. Ainsi avec $\theta_p = 30^\circ$ l'écoulement en masse a été obtenu avec $D > D_m$ et un écoulement alterné avec $D < D_m$ (D_m calculé avec $\varphi_e = 40^\circ$ et $\varphi_p = 20^\circ$).

En récapitulant, pour les cas où l'écoulement n'a pas été trop perturbé par l'effet de géométrie à la base de la trémie, les prédictions théoriques semblent bien vérifiées avec les estimations $\varphi_e = 40^\circ$ et $\varphi_p = 20^\circ$. Des essais complémentaires seraient nécessaires sur modèle réduit pour confirmer ce résultat.

comparaison avec quelques essais.

Nom essai	Maté- riau	w (%)	ρ (t/ m ³)	θ_p (°)	h (m)	D _v (cm)	σ_c calculée (kPa)	D _m Calculée (cm)	Essais réalisés avec D > D _m ou D < D _m *			
									Nom	D (cm)	w (%)	Mode d'écoulement observé
DOD 14	sable roulé 0/4	3.5	1.45	40	1.7	1	1.2	3	DOD 7	4	2.3	Alterné
									DOD 15	10	3.5	Alterné
DOD 23	Sable broyé de Loire 0/2	4.2	1.5	40	1.7	2	2.5	6.2	DOD 26	8	4.2	en cheminée et alterné
									DOD 27	15	4.2	
DOD 28		4.4		30	1.9	2.4	3.8	6.6	DOD 34	10	4.4	En masse et faible alternance
									DOD 35	10	4.4	
DOD 37		8.3		30	1.9	5.4	8.5	14.8	DOD 38	6*	8.3	Alterné
									DOD 41	15	7.8	En masse Mouvement rapide au centre mais très faible à la paroi
DOD 42		7.8		40	1.7	5.8	7.1	17.6	DOD 44	15*	8.3	En cheminée

* $\varphi_e = 40^\circ$

6.1.4 - TECHNIQUES D'EXPERIMENTATION

Pour établir une comparaison entre la méthode utilisée pour étudier l'écoulement en trémies réelles et celle utilisée pour l'étude de l'écoulement dans le modèle réduit, des essais ont été réalisés avec celui-ci en simulant des configurations semblables à celles des trémies réelles. Il s'agit donc de comparer les résultats obtenus avec les méthodes de visualisation du mode d'écoulement adoptées pour chaque cas : représentation des lignes de ruptures pour les trémies réelles, représentation des trajectoires des points colorés pour le modèle réduit. Les figures 6.1 et 6.2 (resp. 6.3 et 6.4) ont été obtenues avec le sable roulé de Loire (resp. le sable broyé de Loire). Ces figures montrent que les deux méthodes aboutissent à la représentation d'un même phénomène, à savoir l'écoulement en cheminée. La cheminée initiale est matérialisée par une zone sans rupture au sein du matériau pour la première méthode. Elle est représentée par des trajectoires pratiquement verticales pour la seconde méthode. Dans ce cas les expérimentations en centrifugeuse présentent un intérêt considérable car elles permettent de s'affranchir des essais très lourds en trémie grandeur nature tout en offrant la possibilité d'étudier des configurations différentes. Il faut toutefois remarquer que les schémas de rupture montrent une phase d'élargissement de la cheminée initiale (donc d'éboulement de matériau à travers celle-ci) avant le glissement sur les parois. Par contre les

tout en offrant la possibilité d'étudier des configurations différentes. Il faut toutefois remarquer que les schémas de rupture montrent une phase d'élargissement de la cheminée initiale (donc d'éboulement de matériau à travers celle-ci) avant le glissement sur les parois. Par contre les schémas des trajectoires montrent plus le glissement sur les parois après la formation de la cheminée initiale.

Cela semble normal car l'écoulement dans la trémie réelle est tridimensionnel tandis qu'il est bidimensionnel dans le modèle réduit donc se déroule plus facilement. Ainsi il convient de réaliser quelques essais sur modèles réels pour confirmer et valider des résultats obtenus en centrifugeuse. Pour la caractérisation d'un écoulement tridimensionnel le marquage par traceur radioactif sur plusieurs niveaux dans la trémie associé à la technique de représentation des lignes de rupture constitue à notre avis un outil parfaitement adapté et relativement facile à mettre en oeuvre.

6.1.5 - PUISSANCE DU MOTEUR D'UN TAPIS EXTRACTEUR

Le tapis doseur du modèle réduit utilisé en centrifugeuse (chap. 5) est équipé d'un moteur de 0,18 kW. Les écoulements dans ce modèle étaient fortement ralentis avec une configuration semblable à celle de la trémie réelle dissymétrique (Cf 4.3.2) testée à Blois :

- inclinaison par rapport à la verticale de la paroi avant $\theta_a = 37^\circ$
- inclinaison de la paroi arrière $\theta_r = 12^\circ$
- dimension à la base de la trémie : $D = 17.5 \text{ cm}$
- épaisseur de la trémie : $l = 18 \text{ cm}$

Le matériau charge donc le tapis sur une surface de $17,5 \text{ cm} \times 18 \text{ cm}$ soit $0,875 \text{ m} \times 0,90 \text{ m}$ en vraie grandeur. Le ralentissement de l'écoulement résulte sans doute de l'insuffisance en puissance du moteur. L'occasion se présente pour tester si l'approche théorique établie dans la partie 2.4 du chapitre 2 confirme cette affirmation. Comme ce modèle ne s'applique pas directement à une trémie à parois dissymétriques nous allons effectuer le calcul de la puissance nécessaire avec :

- une trémie symétrique d'inclinaison $\theta_a = 37^\circ$
- une trémie symétrique d'inclinaison $\theta_r = 12^\circ$
- une trémie équivalente obtenue en suivant la méthode de décomposition explicitée dans 6.2.3.1-b (Cf fig 6.10).

En estimant que l'angle de frottement interne effectif φ_e vaut 40° , on obtient les résultats présentés dans le tableau 6.3. Ces résultats montrent que la puissance nécessaire augmente lorsque la vitesse du tapis croît et lorsque l'angle d'inclinaison de la paroi θ_p ou l'angle de frottement à la paroi φ_p diminue. L'extraction avec une vitesse du tapis de 15 m/min ne peut être possible. Même à 7.8 m/min il peut y avoir des problèmes car le poids du matériau transporté par le tapis après la sortie de la trémie n'a pas été pris en compte dans le calcul. Le ralentissement de l'écoulement a donc été dû à l'insuffisance de la puissance du moteur.

Figure 6.1 - Schémas des lignes de rupture en trémies réelles avec le sable roulé de Loire

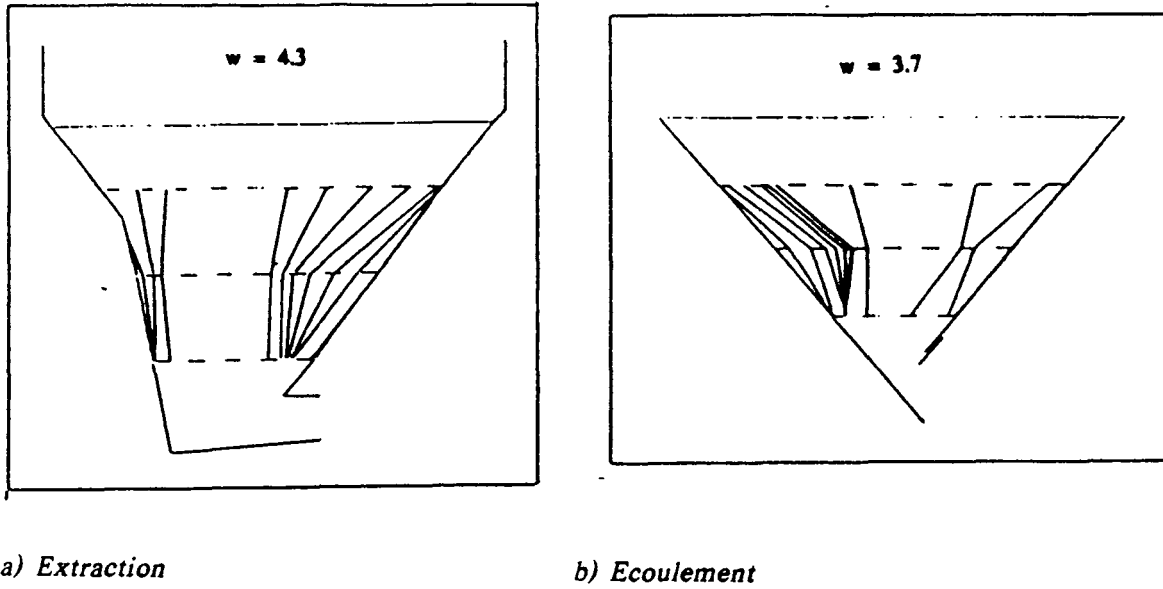


Figure 6.2 - Trajectoires des points marqués dans les modèles réduits correspondants

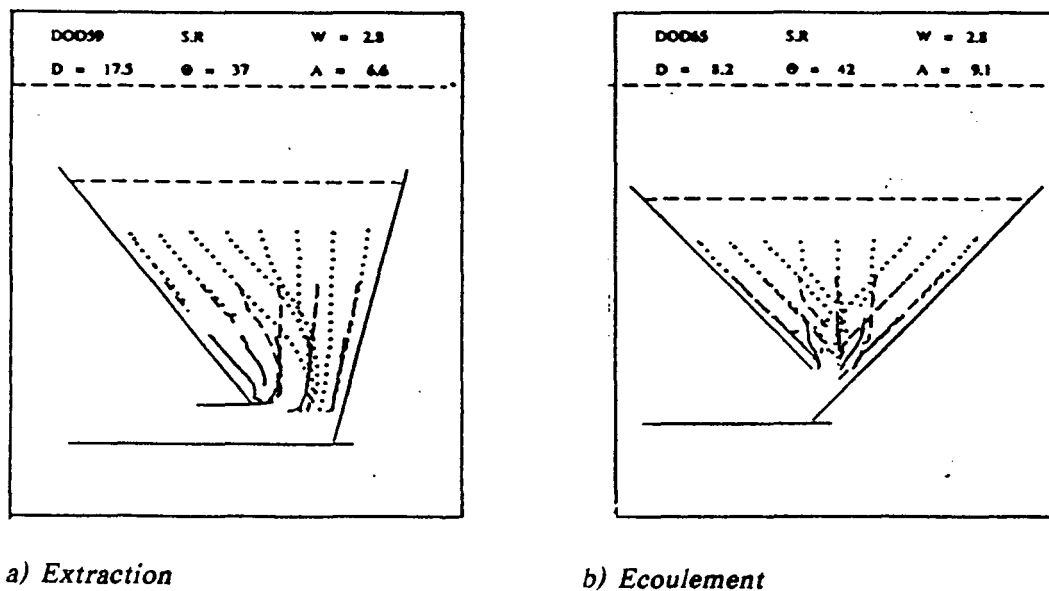
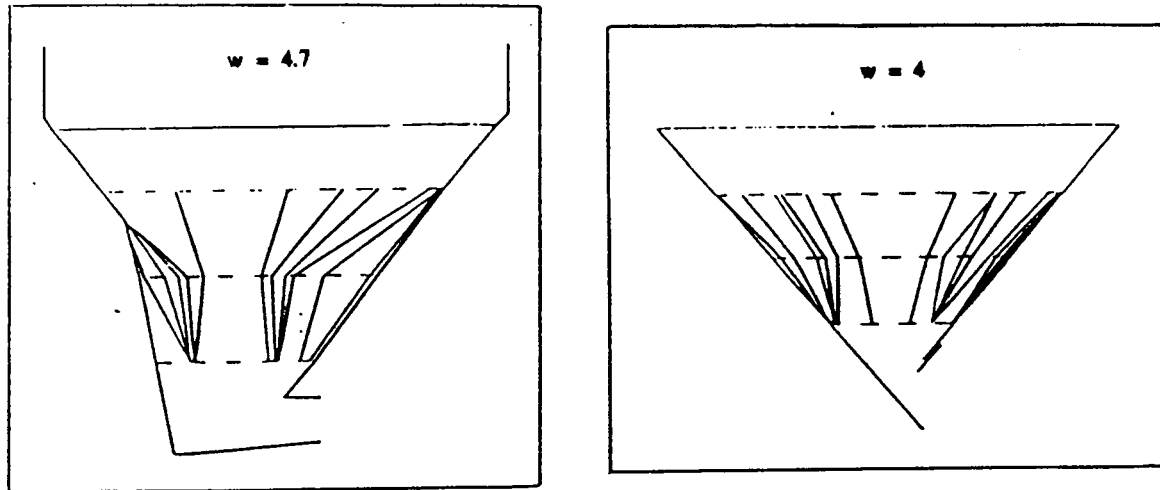


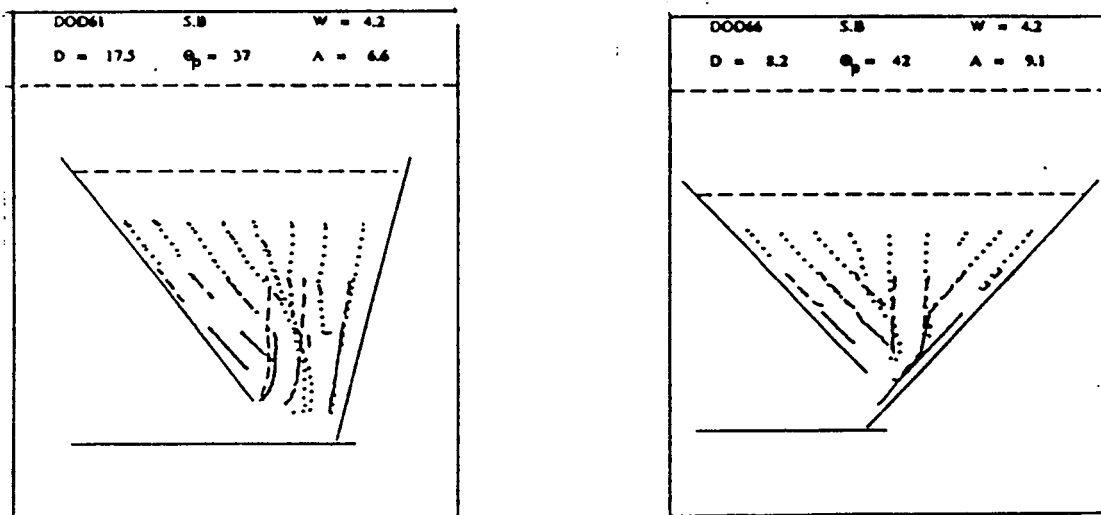
Figure 6.3 - Schémas des lignes de rupture en trémies réelles avec le sable broyé de Loire



a) Extraction

b) Ecoulement

Figure 6.4 - Trajectoires des points marqués dans les modèles réduits correspondants



a) Extraction

b) Ecoulement

Tableau 6.3 - Evaluation de la puissance nécessaire pour le moteur d'un tapis extracteur

Trémie	Vitesse du tapis v_t (m/min)	Puissance nécessaire (kW)	
		$\varphi_p = 10^\circ$	$\varphi_p = 20^\circ$
symétrique $\theta_p = 37^\circ$	7.8	0.06	0.05
symétrique $\theta_p = 12^\circ$		0.22	0.16
Equivalente		0.12	0.10
symétrique $\theta_p = 37^\circ$	15	0.21	0.16
symétrique $\theta_p = 12^\circ$		0.58	0.41
Equivalente		0.35	0.26

Caractéristiques du matériau :

angle de frottement interne effectif
masse volumique vrac

$\varphi_e = 40^\circ$
 $\rho = 1.5 \text{ t/m}^3$

Caractéristiques de la trémie :

dimension à la base
hauteur (matériau)
Bidimensionnelle
Epaisseur
Inclinaison du tapis
Coefficient de proportionnalité entre le débit,
la vitesse du tapis et la section utile
de la veine sur le tapis

$D = 0.875 \text{ m}$
 $h = 2.28 \text{ m}$
 $m = 0$
 $l = 0.90 \text{ m}$
 $\alpha = 0^\circ$
 $\zeta = 0.9$

Débit massique :

$q = 130 \text{ t/h}$

6.1.6 - DISTRIBUTION DE VITESSE DANS UNE TREMIE DE DOSAGE

L'analyse de la distribution de vitesse dans la trémie par la représentation des lignes iso-module de vitesse a été effectuée au chapitre 5 (Cf 5.6.4.3.-b). Il en ressort quelques points importants que nous allons comparer avec les prédictions théoriques (Cf 2.2.5) :

- la distribution de vitesse dans la trémie ne cesse pas d'évoluer pendant la vidange notamment en mode longitudinal à cause de l'emplacement de l'orifice de sortie (fig 6.5 et 6.6). Cette remarque

montre l'absence d'une phase complètement stable et d'une symétrie du champ de vitesse, deux hypothèses admises pour élaborer l'approche théorique. On note ainsi une différence nette des profils de vitesse théoriques et expérimentaux. Il convient toutefois de signaler que pour mieux établir la comparaison il faudrait effectuer les essais en alimentant continuellement la trémie jusqu'à la disparition des points colorés. Cette démarche se rapproche plus de l'idée d'un écoulement stationnaire. Pour avoir plus de précision sur le profil de la vitesse il faudrait aussi augmenter le nombre des points colorés à suivre.

- Malgré l'évolution de la répartition des vitesses dans la trémie pendant la vidange leurs modules semblent se maintenir autour d'un certain ordre de grandeur. En effet la figure 6.7, obtenue en suivant la trajectoire de chaque point coloré et en calculant la vitesse théorique sur ses différentes positions montre que cet ordre de grandeur correspond à la prédiction théorique. Cette concordance explique l'obtention de débits constants pendant les essais ce qui est suffisant et satisfaisant pour le cas du dosage. Elle met aussi en confiance quant à la technique de traitement d'images. En effet les modules des vitesses expérimentales ont été obtenus à partir des déplacements des points colorés enregistrés pendant une durée relativement brève de 160 ms. Il convient toutefois de signaler que l'approche théorique tend à donner des valeurs plus grandes de la vitesse aux voisinages des limites c'est à dire des parois (fig 6.7 points 1, 5 et 6) et de l'orifice de sortie.

6.2 - PROPOSITION DE REGLES DE CHOIX DE LA GEOMETRIE D'UNE TREMIE DE DOSAGE DES GRANULATS

Bien qu'il reste encore beaucoup à faire dans la validation de l'approche théorique établie au chapitre 2, les confrontations qui viennent d'être effectuées comportent des points positifs. Ainsi il s'avère intéressant d'indiquer dans cette partie comment utiliser ce modèle pour dimensionner géométriquement une trémie de dosage des granulats.

6.2.1 - DETERMINATION DES PROPRIETES D'ECOULEMENT DES MATERIAUX A DOSER

La qualité du dosage dépend du déroulement de l'écoulement dans la trémie. Or le phénomène d'écoulement implique à la fois le matériau et le matériel. Il est donc indispensable de connaître les propriétés d'écoulement des matériaux à doser pour déterminer la géométrie de la trémie. Pour la détermination des caractéristiques des matériaux, une présentation de la méthode ainsi qu'une discussion sur les matériels à utiliser figurent dans la partie 1.2.2 du chapitre 1. Il faut souligner la nécessité de réaliser les essais suivant les conditions réelles de sollicitation dans la trémie pendant l'écoulement. Pour la masse volumique apparente la technique de mesure utilisant le phénomène d'atténuation d'un faisceau γ dans la matière (Cf 4.2.2) s'avère convenable. Lorsque la trémie doit fonctionner avec des matériaux de comportements différents à l'écoulement il convient de classer ces matériaux (Cf 1.2.2.1-h et 3.1.1). Ensuite il suffit de considérer un ou quelques représentants de chaque classe pour le dimensionnement.

Figure 6.5 - Distribution de vitesse obtenue avec le sable roulé de Loire (DOD 16)

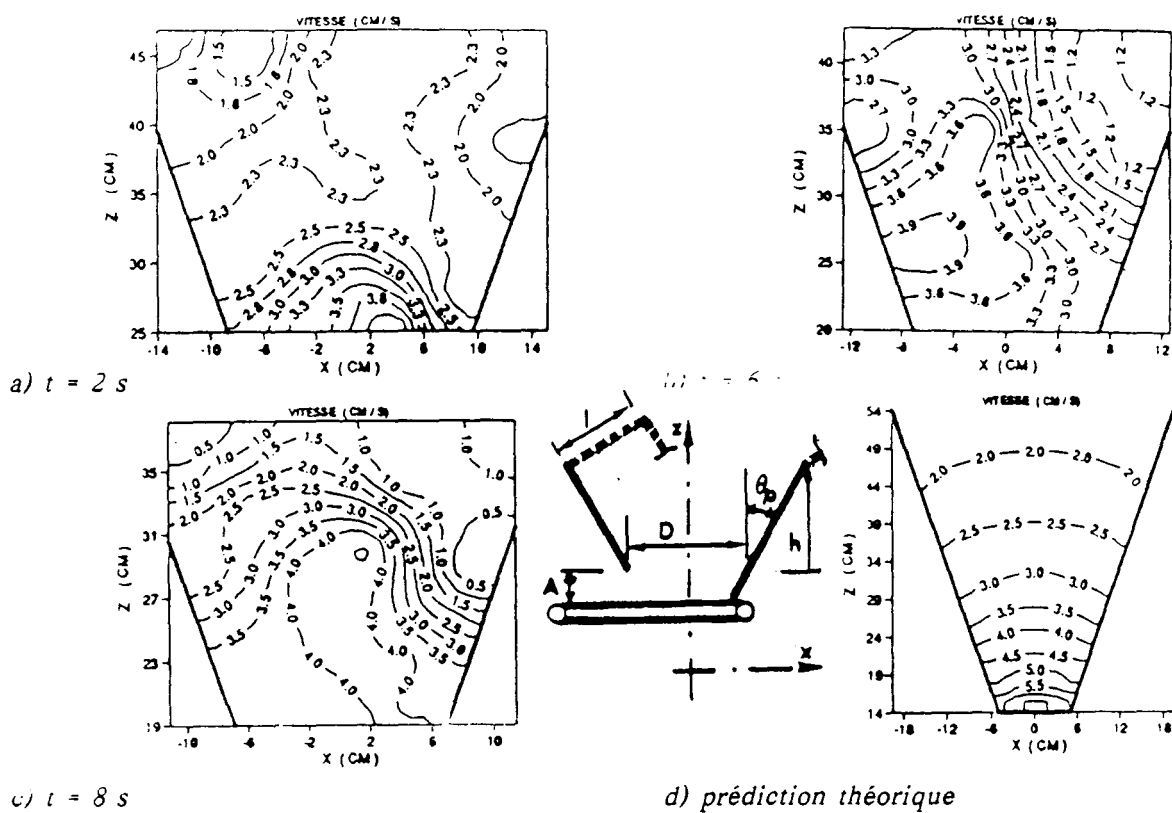


Figure 6.6 - Distribution de vitesse en mode transversal (DOD 52)

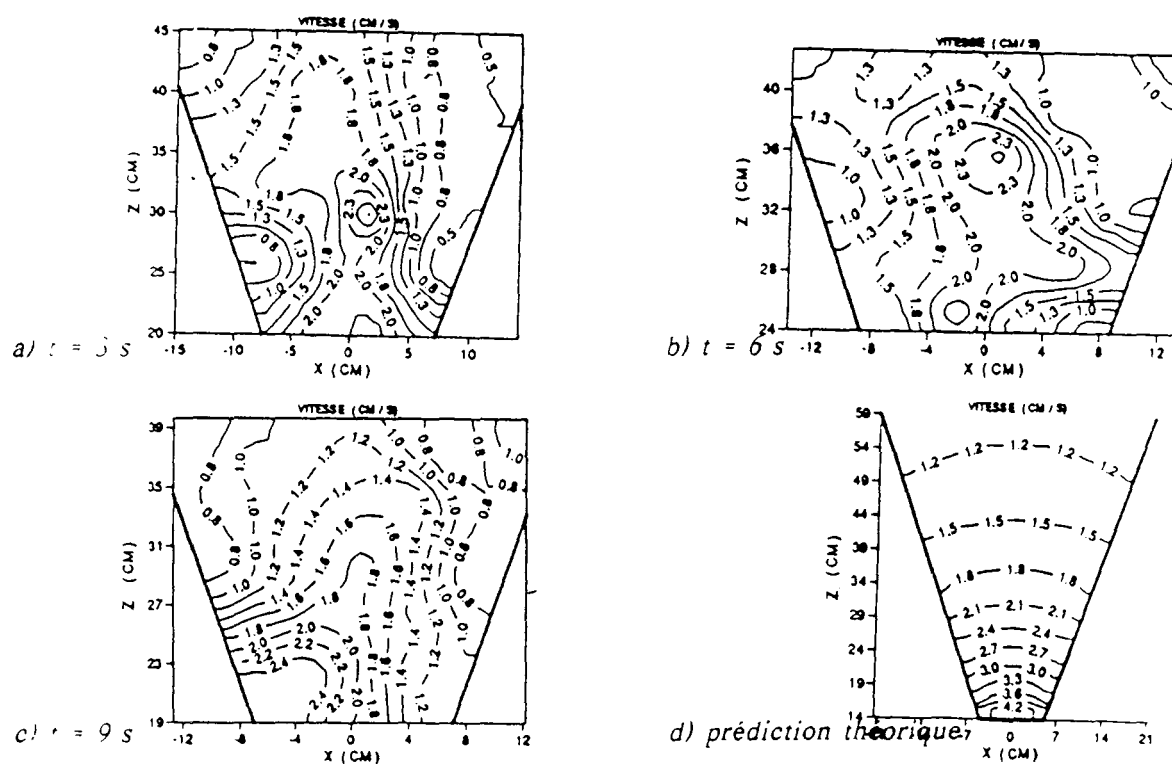
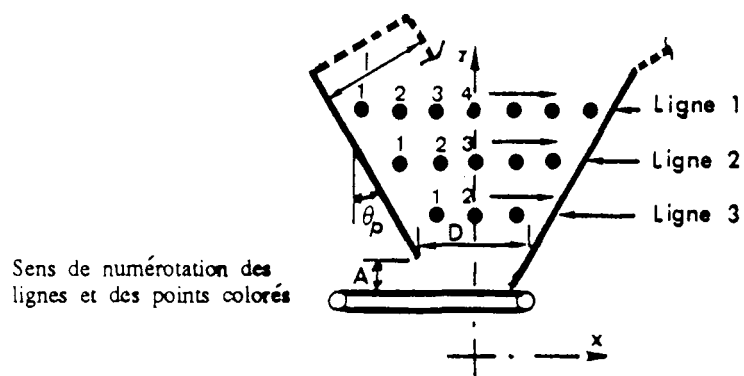
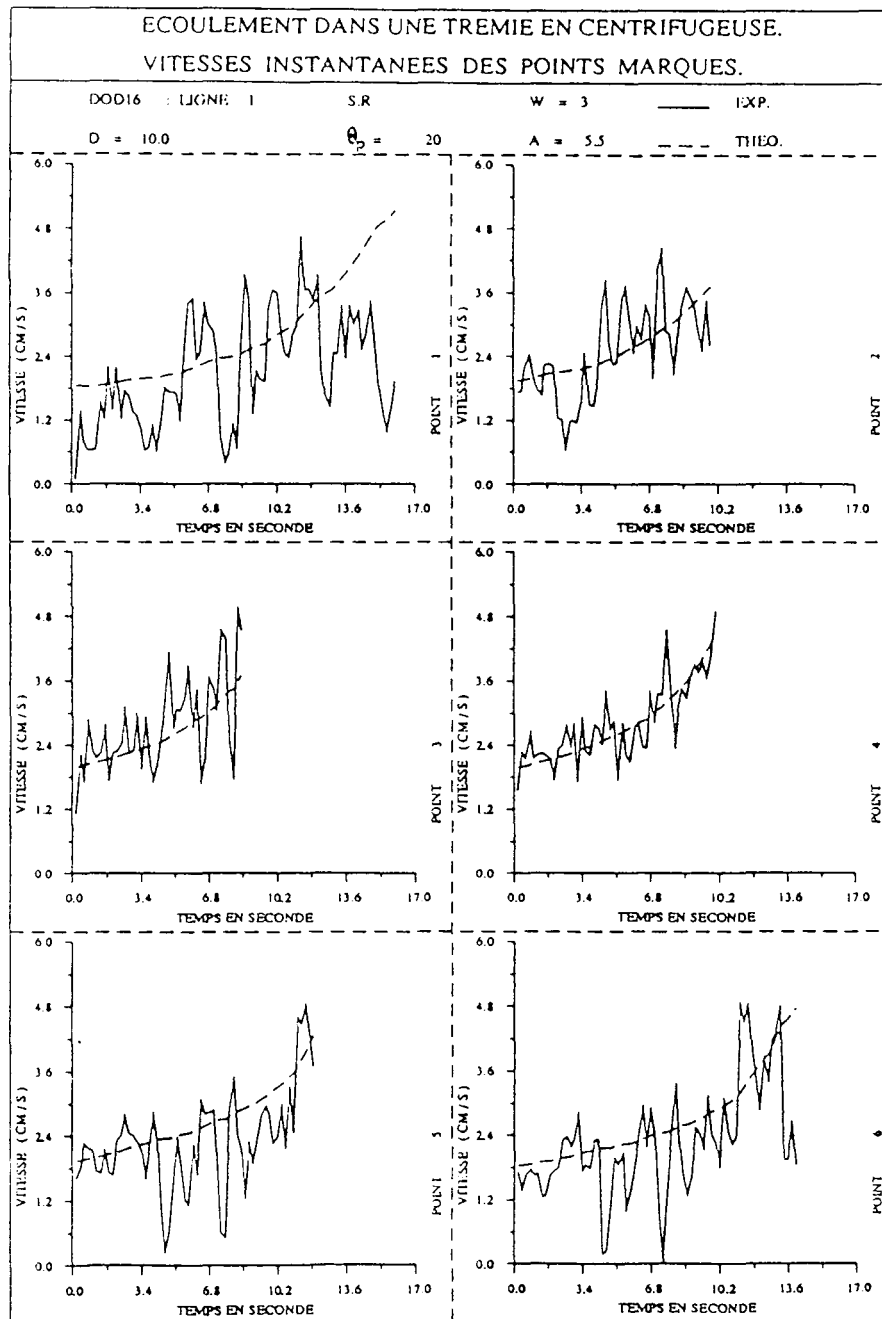


Figure 6.7 - Vitesse individuelle des points marqués avec le sable roulé de Loire



6.2.2 - CHOIX DU TYPE ET DE LA FORME DE LA TREMIE

On utilise généralement deux types de trémie, équipés d'un distributeur à courroie, pour le dosage des granulats: la trémie à écoulement et la trémie à extraction (Cf 1.1.2.1). La forme de la trémie doseuse est couramment soit pyramidale soit pyramidale à section rectangulaire (symétrique ou dissymétrique). Elle peut aussi être tronconique.

6.2.3 - ETAPE PRIMAIRE OU INTERMEDIAIRE DANS LE CHOIX DES DIMENSIONS DE LA TREMIE

Cette étape consiste à définir provisoirement les dimensions de la section de la trémie au niveau de la sortie du matériau ainsi que les inclinaisons des parois. Les valeurs trouvées vont ensuite être confrontées aux exigences liées à l'exploitation du matériel (étape suivante).

6.2.3.1 - GEOMETRIES CRITIQUES

Au départ il faut se donner soit les dimensions de la section à la base de la trémie soit les inclinaisons des parois en fonction de certaines contraintes d'exploitation telles que volume total de matériau requis ou largeur maximale du tapis extracteur.

Ensuite, on détermine les valeurs critiques des dimensions laissées arbitraires. Deux cas sont possibles :

A - TREMIES TRONCONIQUE, PYRAMIDALE ET A ECOULEMENT PLAN SYMETRIQUE

Le modèle théorique établi au chapitre 2 s'applique directement dans le calcul de la valeur critique soit de l'inclinaison θ_p de la paroi, soit de la dimension à la base D :

- la formule (2.47) utilisant (2.18) et (2.19) pour une situation de voûte stable critique
- la formule (2.48) utilisant (2.21), (2.22) et (2.23) pour l'écoulement en masse critique.

Ces formules permettent de voir l'évolution d'un paramètre de géométrie en fonction des différentes caractéristiques du matériau en utilisant une résolution numérique consistant à trouver les zéros d'une fonction. Ainsi des abaques peuvent être établis tels que ceux présentés dans la figure 6.8.

Il a été signalé dans la partie 2.3.4.1 que le paramètre h (hauteur de matériau) influe très peu dans les calculs des dimensions critiques. En fait, son effet est implicitement prise en compte soit dans la stabilité σ_c du matériau, soit dans sa masse volumique vrac ρ . On peut donc choisir la valeur de h pour la trémie pleine. Dans ce cas et compte tenu des remarques faites dans 1.4.2.2 et 2.2.4.1, on peut faire disparaître le terme introduisant h dans les formules (2.47) et (2.48). Il en résulte des formules approximatives pour les dimensions critiques de la trémie :

- pour le cas d'une voûte stable critique :

$$D_v = \frac{\sigma_c (P_a + 1) \sin \theta_v}{\rho g X_a} \quad (6.1)$$

Les expressions de X_a et P_a figurent dans (2.19) utilisant (2.18).

On peut aussi exprimer θ_v :

$$\theta_v = \text{Arcsin} \left[\frac{\rho g X_a D_v}{\sigma_c (P_a + 1)} \right] \quad (6.2)$$

Pour les deux formules (6.1) et (6.2)

$$\begin{aligned} X_a &= \frac{k+1}{2} \\ Y_a &= \frac{(m+1)(k+1)}{2} \\ P_a &= (1-k)(m+1) \\ k &= \frac{1+\sin\varphi_e}{1-\sin\varphi_e} \end{aligned}$$

- Pour le cas d'un écoulement en masse critique :

$$D_m = \frac{\sigma_c (P + 1) \sin\theta_m}{X} \quad (6.3)$$

dans laquelle :

$$X = \rho g (X_1 \cos\theta_p + X_2 \sin\theta_p)$$

$$P = P_1 + P_2 \cot\theta_p$$

$$X_1 = - \frac{1 - \sin\varphi_e \cos 2\varphi_p}{\cos^2 \varphi_e}$$

$$X_2 = - \frac{\sin\varphi_e \sin 2\varphi_p}{\cos^2 \varphi_e}$$

$$P_1 = \frac{\sin\varphi_e \cos 2\varphi_p \sin^2 \varphi_e}{\cos^2 \varphi_e} \left[2 + m + 2 \left(\frac{d\psi}{d\theta} \right)_p \right] + \frac{m}{\cos^2 \varphi_e} [-\sin\varphi_e + \sin^2 \varphi_e \cos^2 \varphi_p]$$

$$P_2 = \frac{m}{\cos^2 \varphi_e} [\sin\varphi_e \sin 2\varphi_p (1 - \sin\varphi_e - \sin\varphi_e \cos 2\varphi_p)]$$

$$\varphi_p = \frac{1}{2} \left[\pi + \varphi_p + \text{Arcsin} \left(\frac{\sin\varphi_p}{\sin\varphi_e} \right) \right]$$

$$\left(\frac{d\psi}{d\theta} \right)_p = \frac{\varphi_p - \frac{\pi}{2}}{\theta_p}$$

Si la trémie sert seulement à doser des matériaux appartenant à la même classification vis à vis du comportement à l'écoulement, il convient de prendre les valeurs les plus défavorables de leurs paramètres (par exemple la plus grande valeur de φ_p ou de φ_e ou de σ_c) pour déterminer les dimensions critiques. Si le dosage concerne plusieurs catégories de matériaux, il est souhaitable de déterminer les dimensions critiques pour chacune d'elles ou tout au moins pour le matériau le plus facile et celui le plus difficile en vue d'un éventuel compromis dans le choix de la géométrie.

B - TREMIE "PYRAMIDALE" A SECTION RECTANGULAIRE

Le modèle mis au point au chapitre 2 ne s'applique pas directement au cas d'une trémie à section rectangulaire qui, pourtant, est beaucoup utilisée dans la pratique. Il va falloir décomposer le problème pour se ramener aux cas simples d'écoulements axisymétrique (3 dimensions) et plan symétrique (2 dimensions). Nous proposons dans cette partie quelques façons de procéder à cette décomposition. Les résultats obtenus avec les cas simples doivent ensuite être pondérés de façon à se rapprocher le mieux du cas réel en se basant sur des observations expérimentales ou des expériences pratiques.

- Cas d'une trémie symétrique

Soit la trémie symétrique à section rectangulaire représentée par la figure 6.9. Les parois s'inclinent par rapport à la verticale de θ_1 dans le sens longitudinal (trémie T_1) et de θ_3 dans le sens transversal (trémie T_3). L'ouverture à la base est rectangulaire $D \times l$ ($l \leq D$).

* Si $\theta_1 = \theta_3$ il suffit d'étudier la trémie T_3 en considérant un écoulement axisymétrique

* Si $\theta_1 \neq \theta_3$, la démarche consiste à étudier les deux trémies T_1 et T_3 en considérant d'abord le cas d'un écoulement plan puis celui d'un écoulement axisymétrique. Le premier cas tend à minorer les valeurs des dimensions critiques tandis que le second tend à les majorer.

- Cas d'une trémie dissymétrique

Soit la figure 6.10 qui représente une trémie dissymétrique dans le sens longitudinal et symétrique dans le sens transversal.

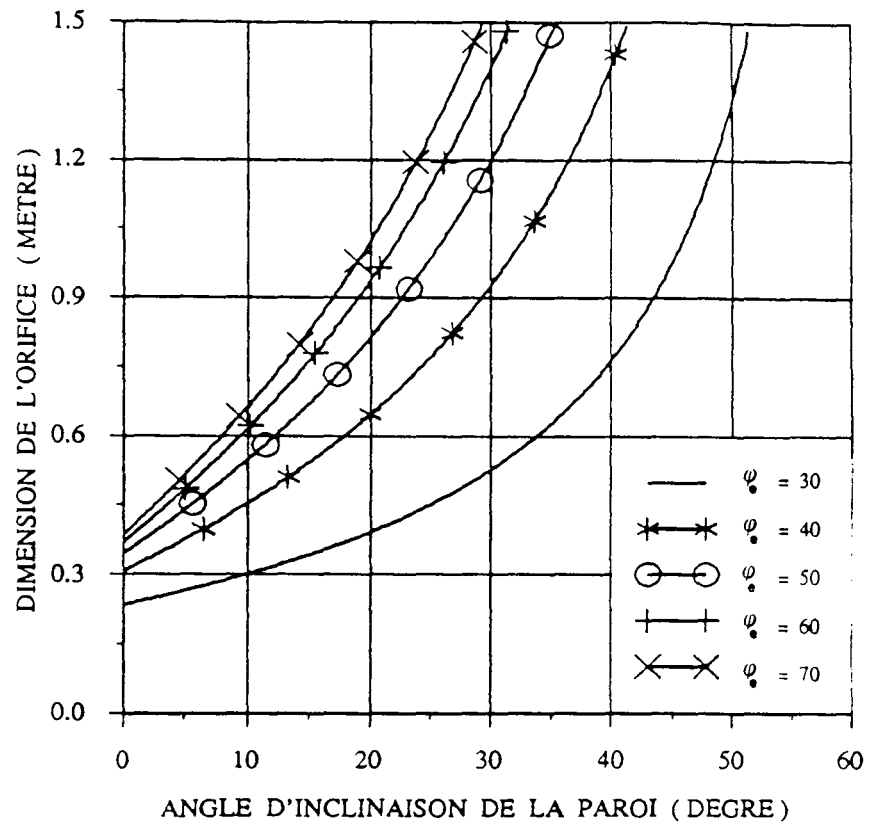
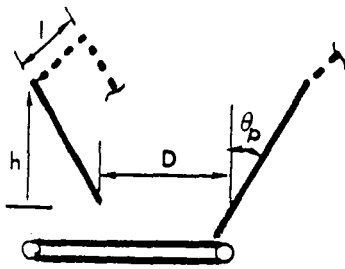
Suivant le sens longitudinal la paroi arrière s'incline, par rapport à la verticale, de θ_1 et la paroi avant de θ_2 . L'ouverture à la base est D . On procède, comme tel à été le cas du marquage d'une trémie dissymétrique par traceur radioactif (Cf 4.2.1.2), en séparant la trémie par un plan imaginaire vertical passant par le sommet virtuel de la trémie (fig 6.10a). On considère la partie arrière comme la moitié d'une trémie symétrique T_2 . T_1 s'ouvre à la base de D_1 et T_2 de D_2 avec :

$$D = \frac{1}{2} (D_1 + D_2)$$

Figure 6.8 - Abaques permettant de déterminer les dimensions critiques d'une trémie pour l'écoulement en masse.

Matériau : $\varphi_p = 25^\circ$, $\sigma_c = 5 \text{ kPa}$, $h = 2 \text{ m}$, $\rho = 1.5 \text{ t/m}^3$

a) trémie
axisymétrique



b) trémie
bidimensionnelle

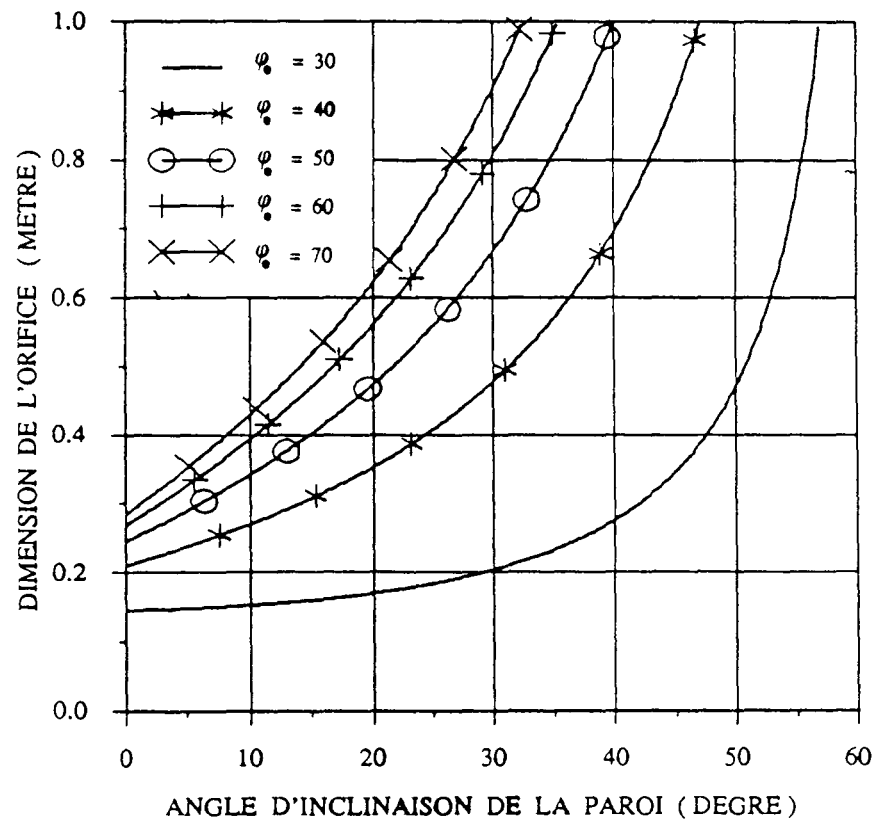


Figure 6.9 - Trémie à section rectangulaire symétrique

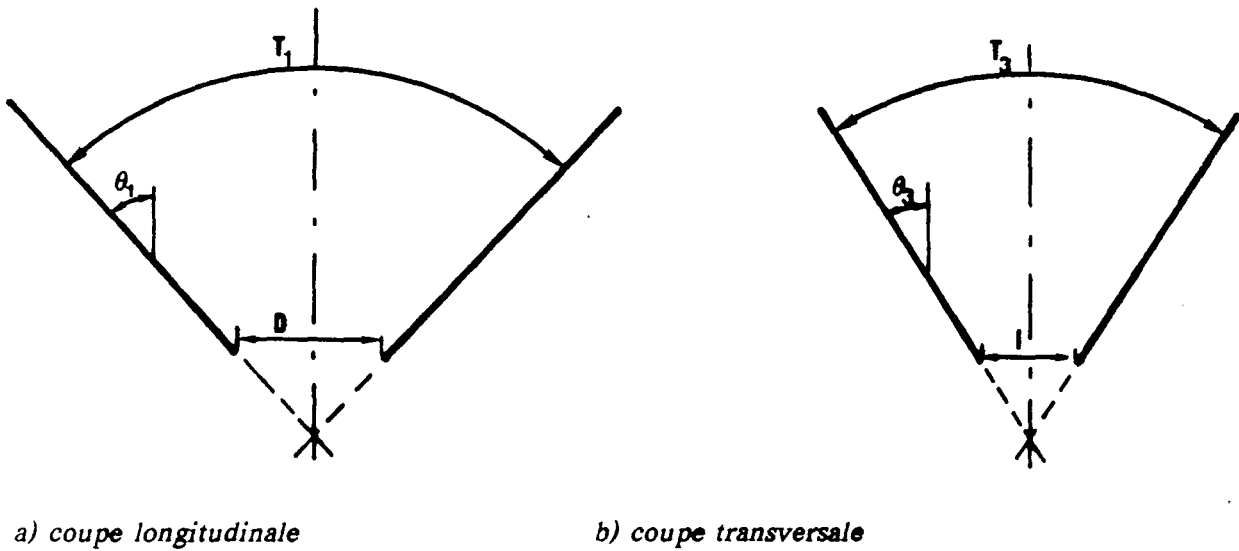
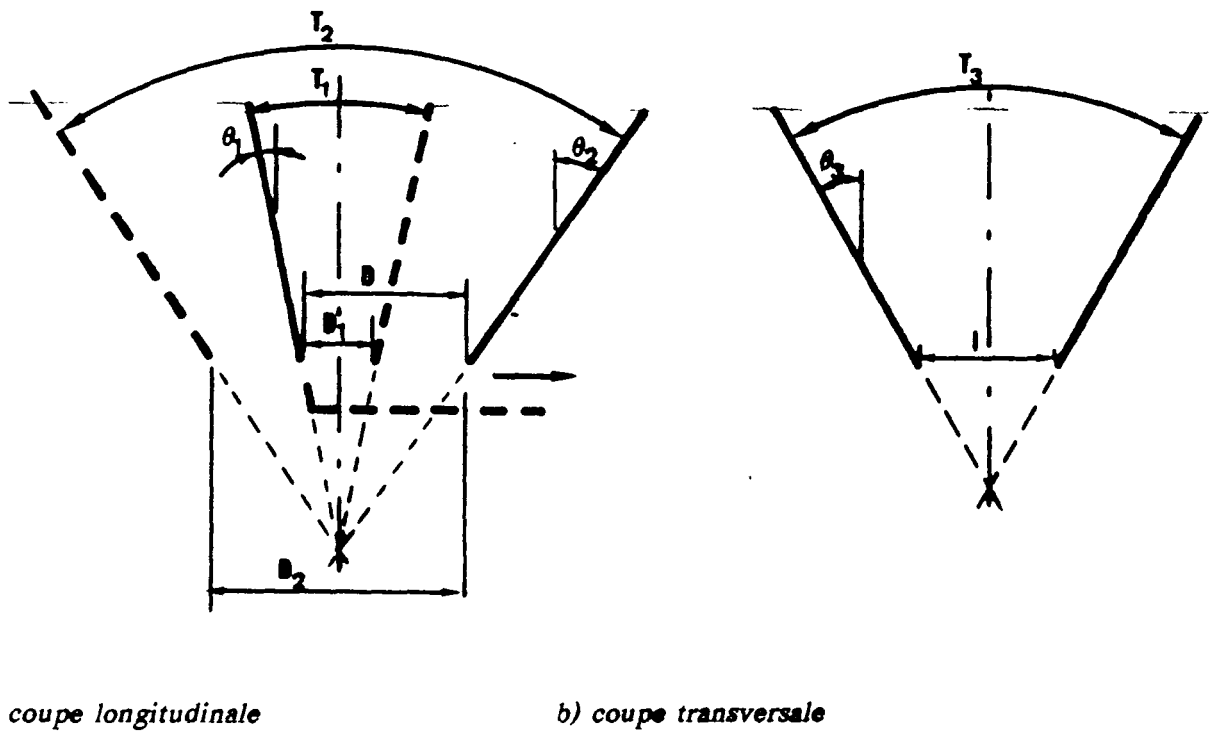


Figure 6.10 - Trémie à section rectangulaire dissymétrique



Suivant le sens transversal les parois s'inclinent de θ_3 par rapport à la verticale (trémie T_3).

Le problème revient maintenant à étudier les trois trémies T_1 , T_2 et T_3 en considérant d'abord, comme ci-dessus, un écoulement plan puis un écoulement axisymétrique. Pour la trémie T_1 il convient de considérer le matériau lui-même comme paroi fictive. Dans ce cas il faut prendre φ_M comme angle de frottement à la paroi, φ_M étant l'angle de frottement maximal mobilisable à la paroi pendant l'écoulement (voir la formule (2.49) du chapitre 2 pour la détermination de φ_M).

6.2.3.2 - GEOMETRIE CHOISIE

Une fois les géométries critiques déterminées pour les différentes catégories de matériau à doser, il est maintenant possible de se fixer les dimensions de la trémie à concevoir. Grâce à la partie 2.3 du chapitre 2 on peut aussi avoir une idée du mode d'écoulement dans la trémie suivant les comportements des matériaux. Il faut bien sûr choisir les dimensions de façon à éviter un phénomène de voûte stable et l'idéal serait d'obtenir toujours l'écoulement en masse. Au cas où, pour certains matériaux, l'écoulement en cheminée peut être toléré il faut néanmoins s'assurer que celle-ci ne se stabilise pas pendant la vidange (Cf. 6.3.1), sinon il faut équiper la trémie d'un dispositif d'aide à l'écoulement.

6.2.4 - VALIDATION DU CHOIX AVEC LES CONTRAINTES D'EXPLOITATION

Les dimensions de la trémie de dosage retenues doivent respecter certaines conditions notamment celles liées :

- au transport de celle-ci vers le chantier : encombrement maximal
- à l'installation sur le chantier : concordance avec les autres équipements de l'installation notamment avec les dimensions du tapis doseur,
- au fonctionnement sur le chantier :
 - * hauteur et volume adéquats pour qu'un chargeur à godet, par exemple, puisse alimenter sans difficulté la trémie,
 - * la trémie doit permettre d'atteindre plusieurs gammes de débit
 - * elle doit assurer un débit constant.

Tant que l'ensemble de ces conditions n'est pas vérifié, il faut modifier les dimensions choisies dans l'étape précédente tout en se référant aux géométries critiques. Au besoin il faut munir la trémie d'un dispositif d'aide à l'écoulement.

6.2.5 - DIMENSIONNEMENT DU DISPOSITIF DE DOSAGE

6.2.5.1 - GEOMETRIE AU NIVEAU DE LA SORTIE DU MATERIAU

Pour pouvoir réaliser un dosage correct la trémie et son dispositif de dosage doivent fonctionner harmonieusement. Un dispositif de dosage mal conçu peut causer des problèmes bien que la trémie soit correctement dimensionnée. Généralement on installe à la base de la trémie un système qui assure la jonction avec le tapis doseur. Pour les ouvertures circulaires (resp. carrées) un tube long d'un diamètre (resp. un côté) connecte généralement [5] ceux-ci. Pour les ouvertures rectangulaires il convient d'accroître la zone d'extraction vers la sortie :

- distance horizontale entre les joues latérales augmentant vers l'avant (Cf fig 1.3.c, d - chap 1)
- distance verticale entre joue latérale et tapis doseur augmentant vers l'avant (Cf fig 1.3.c, chap 1). Dans ce cas le matériau repose librement suivant son angle de talutage sur le tapis.

Ce n'est qu'après la sortie du matériau qu'on peut installer un système qui régularise l'épaisseur de veine. Il faut éviter les coins morts qui constituent des obstacles et entraînent des fortes consommations d'énergie [71]. Nous avons aussi montré au chapitre 2 (Cf 2.4.4) l'inconvénient d'une ouverture de trappe trop faible et d'une inclinaison de tapis trop forte. Cette approche théorique permet d'estimer le risque de glissement matériau-tapis ainsi que la dépense en énergie dus à la géométrie d'un système d'extraction.

6.2.5.2 - PUISSANCE DU MOTEUR D'UN DISPOSITIF DE DOSAGE

- Cas d'une trémie à extraction

La méthode explicitée dans la partie 2.4 du chapitre 2 permet de dimensionner correctement un dispositif de dosage en fonction de la géométrie au niveau de l'extraction et des caractéristiques du tapis doseur, du matériau ainsi que de la trémie. Elle permet aussi de gérer la consommation d'énergie et de doter le moteur du tapis d'une puissance suffisante. Bien que les formules paraissent parfois assez lourdes, la démarche à suivre est suffisamment simple. Il faut ajouter à cette puissance celle nécessaire pour transporter le matériau situé entre la sortie et le bout du tapis si cette distance s'avère importante.

- cas d'une trémie à écoulement

Pour une trémie à écoulement (voir définition dans 1.1.2.1 du chapitre 1), le contenu de la trémie ne charge pas le tapis doseur. Seul donc le poids du matériau transporté par ce dernier entre dans le calcul.

6.2.6 - DIMENSIONS DEFINITIVES DE LA TREMIE DE DOSAGE

Les dimensions de la trémie, munie éventuellement d'un dispositif d'aide à l'écoulement, et celles du dispositif de dosage qui satisfont aux différentes conditions énoncées dans 6.2.4 et 6.2.5.1 sont

retenues définitivement sauf si le dimensionnement vis-à-vis des efforts ou le contexte économique oblige encore à apporter quelques modifications.

6.3 - PRISE EN COMPTE DES PHASES TRANSITOIRES DE FONCTIONNEMENT

6.3.1 - MECANISME DE L'ÉCOULEMENT DANS UNE TRÉMIE EN CHANTIER

En chantier, lorsqu'une centrale de fabrication fonctionne en continu, un chargeur à godet vient régulièrement alimenter les trémies doseuses à granulats. Généralement il règne un écoulement en cheminée dans ces trémies. Lorsque le chargeur rajoute du matériau, celui-ci s'écoule à travers la cheminée tandis qu'il se forme autour de cette cheminée une zone morte. Il arrive dans certains cas que la taille de la cheminée diminue davantage et au bout de quelques chargements l'écoulement s'arrête. Pour éviter ce problème on fait parfois appel à un vibreur qui déstabilise la cheminée ou alors on laisse la trémie se vider suffisamment avant de remplir de nouveau.

L'étude des formations de voûte et de cheminée réalisée au chapitre 2 (Cf 2.3) permet d'expliquer ce phénomène. Pour cela considérons une trémie en écoulement dont les parois s'inclinent de θ_p de la verticale et d'ouverture à la base D . Soient D_v et D_m les dimensions critiques de l'ouverture, pour θ_p fixé, respectivement pour la formation de voûte stable et l'écoulement en masse. Pour θ_p donné, suivons l'évolution de l'ouverture D_{ch} de la cheminée au niveau de la sortie lorsque D varie (fig 6.11)

- si $D \geq D_m$ il y a écoulement en masse : $D_{ch} = D$. La courbe $D_{ch}(D)$ suit donc la bissectrice
- si $D_v < D < D_m$ il y a écoulement en cheminée : $D_{ch} < D$. Matérialisons $D_{ch}(D)$ par la courbe en pointillé
- si $D \leq D_v$ il y a voûte stable : $D_{ch} = 0$. $D_{ch}(D)$ suit l'axe des abscisses D .

Maintenant fixons D tel que $D_v < D < D_m$ puis suivons l'évolution de l'ouverture D_{ch} de la cheminée à chaque chargement (fig 6.11). À la suite du premier chargement il se forme une cheminée 1 d'ouverture D_{ch1} à la sortie. Cette cheminée se comporte comme une nouvelle trémie pour le second chargement. Il en résulte une cheminée 2 d'ouverture D_{ch2} . Après le troisième chargement l'ouverture à la base de la trémie n'est plus que D_{ch3} . Si l'alimentation continue l'orifice de sortie finit par s'obstruer et rien ne s'écoule.

En conclusion, la définition de la formation de cheminée comme une situation intermédiaire entre formation de voûte stable et un écoulement en masse a permis d'expliquer le mécanisme de l'écoulement dans une trémie en chantier. La règle de conception proposée ci-dessus est donc valable pour trémie fonctionnant en continu.

6.3.2 - CONSIDERATION DE LA PHASE INITIALE DE L'ÉCOULEMENT - MODELE 2

Les phénomènes de voûte stable mis en évidence lors des expérimentations en centrifugeuse se produisaient dès le démarrage de l'écoulement. Pendant les essais en trémies réelles avec les sables fillérisés (avec fines) à forte teneur en eau et les cendres volantes il fallait mettre le vibreur en marche dès le début de la vidange sinon il se produisait une voûte stable ou une cheminée stable.

Les problèmes d'écoulement peuvent donc apparaître dès la phase initiale de l'écoulement. Pour tester notre modèle théorique vis à vis de cette dernière nous allons construire un second modèle (modèle 2) qui prend en compte cette phase initiale d'écoulement. On va travailler avec le lieu d'écoulement initial du matériau (Cf fig 1.5 chap 1) en supposant que celui-ci peut être linéarisé pour avoir un angle de frottement interne initial φ_i constant.

Figure 6.11 - Mécanisme de l'écoulement dans une trémie en chantier

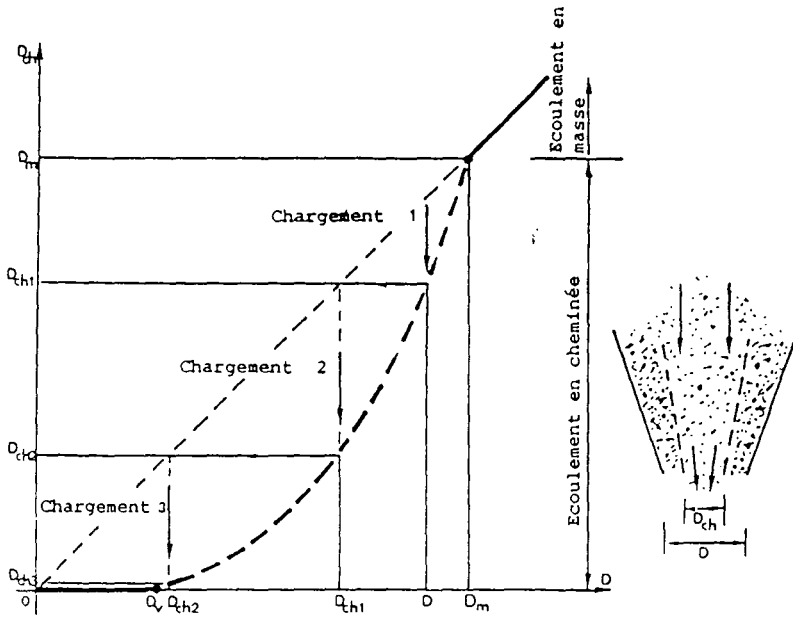
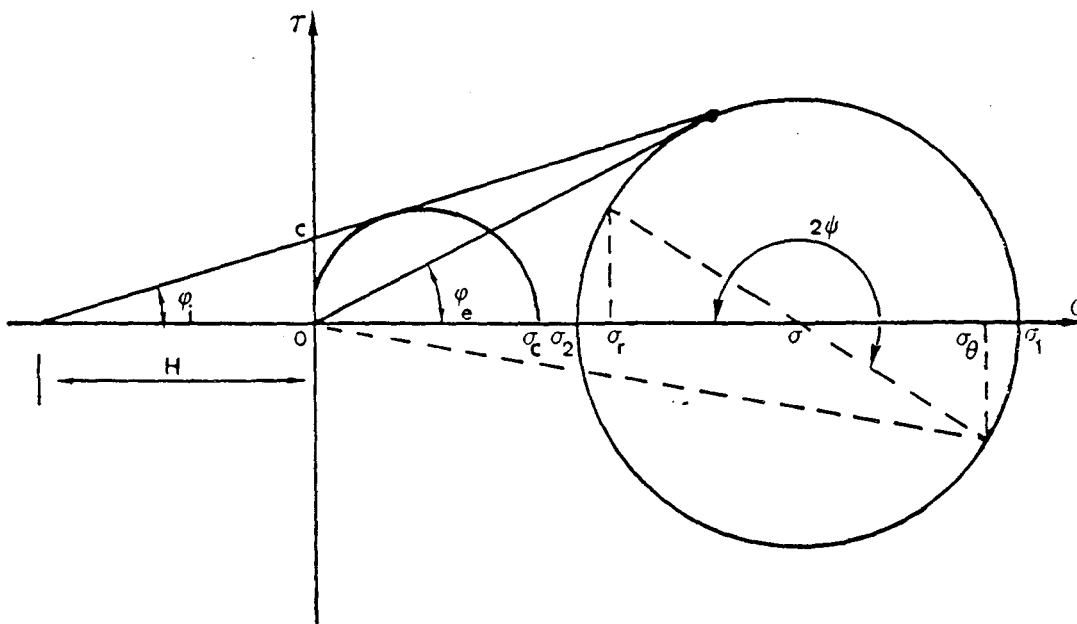


Figure 6.12 - Cercle de Mohr représentant une situation de voûte, la phase initiale d'écoulement et le point d'écoulement établi.



- la condition de Coulomb s'écrit :

$$\sigma_i = \frac{1 + \sin\varphi_i}{1 - \sin\varphi_i} + \frac{2\cos\varphi_i}{1 - \sin\varphi_i} c \quad (6.4)$$

- les conditions de Mohr-Coulomb s'écrivent :

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \sigma (1 + \sin\varphi_i \cos 2\psi) - H \\ \sigma_\theta &= \sigma (1 - \sin\varphi_i \cos 2\psi) - H \\ \tau_{r\theta} &= \sigma \sin\varphi_i \sin 2\psi \end{aligned} \quad (6.5)$$

avec

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + H \quad (6.6)$$

et $H = c \cot\varphi_i$

Avec ces nouvelles équations de Mohr-Coulomb on peut reprendre l'étude élaborée au chapitre 2 (partie 2.2 et 2.3), il suffit tout simplement de remplacer :

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \quad \text{par} \quad \sigma = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} + H$$

et φ_e par φ_i

Pour déterminer les géométries critiques de la trémie on écrit

$f(\theta) = 0$ au centre pour la voûte stable et à la paroi pour l'écoulement en masse critique

$$\sigma_r = 0 = \sigma_2 \text{ et } \sigma_\theta = \sigma_c = \sigma_1$$

or lorsque $\sigma_2 = 0$ (6.4) et (6.6) donnent :

$$\sigma = \frac{\sigma_c}{2\sin\varphi_i}$$

Les formules (2.47) et (2.48) du chapitre 2 décrivant respectivement une situation de voûte stable et un écoulement en masse critique restent donc valables à condition de remplacer l'angle de frottement effectif φ_e par l'angle de frottement φ_i et la stabilité σ_c par $\sigma_c / \sin\varphi_i$. Ainsi fut construit

le modèle 2 qui permet d'expliquer les situations de blocage partiel ou total pendant la phase initiale d'écoulement.

La figure 6.13 illustre les prédictions de la géométrie critique d'une trémie pour l'écoulement en masse obtenus avec les deux modèles. Normalement $\varphi_i < \varphi_e$ mais il n'existe pas de relation qui permette de déterminer l'un des deux paramètres connaissant l'autre. Les valeurs de φ_i et φ_e indiquées sur la figure 6.13 sont donc choisies arbitrairement. Néanmoins on constate que le modèle 2 donne des valeurs plus sévères de la dimension de l'orifice D_m . En effet ce modèle semble varier peu avec φ_i alors que la valeur de D_m obtenue avec φ_i faible ($\varphi_i = 30$) est déjà assez grande.

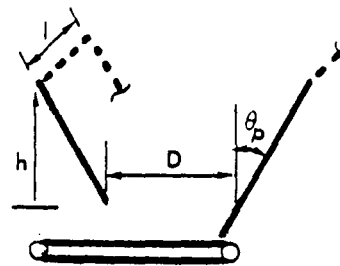
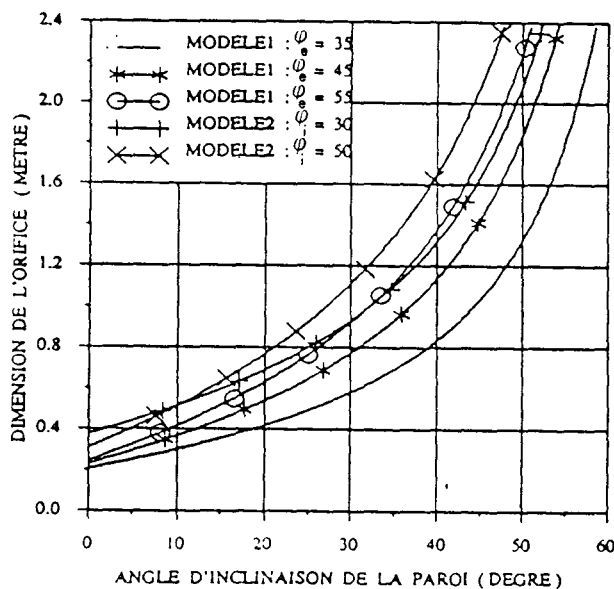
Une valeur faible de φ_i ne signifie donc pas un écoulement facile. Au contraire si la stabilité σ_c du matériau est grande (matériau difficile) φ_i peut être faible (Cf fig 1.5).

Pour le modèle 2 la qualité de l'écoulement après la phase initiale importe peu, ce sont les paramètres σ_c et φ_i qui comptent. Le modèle 1 considère par contre le comportement à l'écoulement du matériau. Ainsi il est sensible au paramètre φ_e qui caractérise plutôt la qualité de l'écoulement après la phase initiale. On constate alors la complémentarité des deux modèles. Maintenant si on veut travailler uniquement avec le modèle 1 il convient de prendre un facteur de sécurité lorsque φ_e est faible et que σ_c est grand notamment pour la prévision des voûtes stables. Ce facteur varie en fonction des valeurs de φ_e et φ_i et cette liaison peut être matérialisée sous forme d'abaque. En effet la figure 6.13 montre que le rapport entre les valeurs de D_m obtenues avec les deux modèles reste pratiquement constant lorsque θ_p varie.

Figure 6.13 - Géométrie de la trémie pour l'écoulement en masse critique

valeurs des autres paramètres :

$$\sigma_c = 4 \text{ kPa} , \quad \rho = 1.5 \text{ t/m}^3 , \quad m = 1 \text{ (axisymétrique)} , \quad h = 2 \text{ m} , \quad \varphi_p = 20^\circ$$



CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Avant de signaler le côté enrichissant et les perspectives d'avenir que nous a procurés ce travail, il semble intéressant de dresser un bilan des principaux résultats obtenus dans le cadre de l'étude du mécanisme de l'écoulement.

1 - BILAN SUR L'ETUDE DU PHENOMENE D'ECOULEMENT

Les études expérimentales entreprises ont permis de dégager quelques paramètres liés soit au matériau soit à la géométrie de la trémie de dosage et qui influent sur l'écoulement. Ainsi des confrontations avec l'étude théorique ont été faites.

En ce qui concerne les matériaux étudiés :

- la teneur en eau a un effet prépondérant sur l'écoulement des sables à forte teneur en fines. En fait cette liaison entre teneur en eau (élevée) et teneur en fines améliore l'aptitude au compactage du matériau et dans cet état la stabilité de celui-ci vis-à-vis de la déformation s'accroît avec son degré de consolidation. Théoriquement l'accroissement de ce dernier et de la teneur en eau augmente les valeurs de la stabilité σ_c et de l'angle de frottement interne effectif φ_e , ce qui est défavorable pour l'écoulement.
- lorsqu'il y a formation de cheminée, sa taille et sa stabilité révèlent le comportement à l'écoulement du produit. Plus le matériau est difficile moins la cheminée est large et plus elle est persistante. Cette constatation concorde avec l'approche théorique établie pour déterminer la frontière d'une cheminée au début de l'écoulement.

En ce qui concerne la configuration du matériel de dosage :

- l'ouverture à la base de la trémie a un effet déterminant sur la taille de la cheminée initiale. En trémies réelles (à section rectangulaire) il s'agit de la plus grande dimension et en trémie bidimensionnelle c'est l'ouverture dans le sens de l'écoulement.
- les phénomènes d'écoulement en masse, de voûte stable et de formation de cheminée ont été mis en évidence en agissant sur la géométrie du modèle réduit. Ils constituent donc les aspects d'un même phénomène. Cela justifie notre démarche consistant à étudier ces trois "modes d'écoulement" à partir d'une même fondement théorique. En effet ils sont étudiés séparément dans certains travaux. Nous considérons alors une formation de cheminée comme une situation intermédiaire entre une formation de voûte stable et un écoulement en masse, définissant ainsi deux géométries critiques de la trémie qui déterminent les frontières entre ces trois "modes d'écoulement". Les essais effectués sur modèles de trémie réelle et sur un modèle réduit confirment ce raisonnement : après la rupture d'une voûte par l'utilisation d'un vibreur (trémie réelle) ou en augmentant l'accélération artificielle (modèle réduit en centrifugeuse) il ne se produisait pas a priori un écoulement en masse.

- la géométrie au niveau de la sortie ou de l'extraction du matériau agit sur le mode d'écoulement. Ainsi le phénomène d'alternance, remarqué pour les essais effectués en mode longitudinal avec le modèle réduit embarqué en centrifugeuse, résulte de la position excentrée de l'orifice d'évacuation. Pour la conception du dispositif de dosage notre modèle théorique prend en compte la géométrie au niveau de l'extraction.

En ce qui concerne l'approche théorique :

- elle comporte des paramètres aussi bien liés au matériau qu'à la géométrie de la trémie. Les résultats obtenus en faisant varier ces différents paramètres montrent de la cohérence. Certaines propriétés d'écoulement des matériaux n'ont pu être déterminées à défaut de matériel approprié. Ainsi certaines confrontations avec les résultats expérimentaux ont été effectuées à partir de valeurs estimatives. Des caractères positifs du modèle théorique ont été constatés mais ils restent à confirmer. Pour la suite de ce travail il faudrait mettre l'accent sur la détermination des propriétés d'écoulement des matériaux et compléter la validation du modèle.

Par rapport à des modèles théoriques établis antérieurement pour déterminer la dimension critique de l'orifice de sortie vis-à-vis de l'écoulement en masse notre méthode est plus sensible aux variations des caractéristiques des matériaux et de la trémie. Généralement elle donne des valeurs plus faibles par rapport à ces modèles mais elle peut aussi donner des valeurs plus fortes pour le cas d'écoulement très difficiles. Dans la pratique ces modèles sont souvent jugés sévères ainsi notre méthode constitue une alternative intéressante.

- elle repose sur un certain nombre d'hypothèses. Pour l'étude de l'écoulement en masse celle-ci reconnaît l'existence d'une phase initiale d'écoulement au cours de laquelle le matériau se dilate pour acquérir une masse volumique optimale qui reste stable pendant l'écoulement. Cette hypothèse a été vérifiée avec les essais réalisés en trémie réelle lorsque l'écoulement est facile (c'est le cas pour l'écoulement en masse). Pour l'écoulement en masse une distribution de vitesse radiale a été adoptée mais cette hypothèse semble d'autant mieux vérifiée que l'angle d'inclinaison de la paroi par rapport à la verticale est faible. Cette distribution de vitesse a été supposée avoir une phase stable. Les essais réalisés en centrifugeuse montrent qu'elle ne cesse d'évoluer pendant la vidange néanmoins le débit d'écoulement se conserve. Sur ce point quelques études supplémentaires nous semblent utiles en augmentant le nombre de points colorés à suivre et en continuant d'alimenter la trémie jusqu'à disparition de ceux-ci. Cette démarche permet de préciser davantage le profil de vitesse et de vérifier si la distribution de vitesse se stabilise lorsque l'alimentation de la trémie se fait en continu (fonctionnement courant sur chantier).

2 - PRINCIPAUX APPORTS DU TRAVAIL

A/ Du point de vue étude théorique de l'écoulement

L'introduction d'une dépendance entre état de contrainte et champ de vitesse a conduit à une généralisation de la formule du débit. Ce dernier dépend de la répartition de contrainte au niveau de la sortie du matériau. Les formules utilisées habituellement pour une vidange simple supposent que cette contrainte est nulle. En revanche celle-ci ne peut s'annuler pour le cas du dosage à cause de la présence d'un dispositif de dosage qui freine l'écoulement naturel. Le débit étant fixé pendant le dosage la répartition de la charge qui s'exerce sur le dispositif de dosage peut alors être déterminée grâce à la formule générale du débit. Celle-ci permet aussi donc de déterminer les conditions aux limites à la sortie pour la détermination des contraintes dynamiques (pendant l'écoulement) s'exerçant dans la trémie pendant le dosage. En effet, les contraintes sont générale-

ment déterminées à partir des seules conditions à la surface libre du matériau et à la paroi, ignorant les conditions à la base de la trémie.

Notre modèle théorique décrit puis formule et l'écoulement en masse et la formation de cheminée et la formation de voûte stable à partir d'un même fondement théorique à la différence avec certains travaux. Ce sont en effet les aspects d'un même phénomène qui évoluent en fonction de la géométrie du matériel. Cette démarche donne lieu à la définition de deux géométries critiques d'une trémie qui déterminent les frontières entre ces trois phénomènes et conduit à une nouvelle méthode de prévision du mode d'écoulement suivant la configuration d'une trémie.

B/ Du point de vue étude expérimentale de l'écoulement

- Pouvoir expérimenter sur des ouvrages réels constitue l'idéal pour l'étude de l'écoulement des matériaux granulaires mais des problèmes se posent lorsqu'il s'agit d'observer le phénomène qui se produit dans la trémie pendant la vidange. Le marquage par traceur radioactif sur différents niveaux de la trémie associé à la méthode de traitement que nous avons mise au point permet de visualiser le mode d'écoulement en trémie réelle. Les résultats obtenus sont d'autant plus précis qu'il y a plus de lignes marquées.

- L'expérimentation avec des trémies réelles nécessite des moyens lourds donc elle est souvent restrictive du point de vue possibilité de faire varier plusieurs paramètres. L'étude avec un modèle réduit en centrifugeuse résout ce problème car elle permet de retrouver des résultats à l'échelle du modèle réel en agissant sur l'accélération de la pesanteur. Nous avons travaillé avec un modèle bidimensionnel mais il est aussi intéressant d'étudier la possibilité d'utiliser un modèle tridimensionnel. Il convient de signaler que des essais effectués avec le même modèle réduit sous la pesanteur (1g) n'ont pas donné les mêmes résultats que ceux effectués en centrifugeuse à 5g concernant la valeur de la dimension critique de l'orifice pour la voûte stable. Selon nos résultats un modèle théorique validé avec des essais sur modèle réduit à 1g peut conduire à un surdimensionnement de la trémie par surévaluation de cette dimension critique.

C/ Du point de vue application pratique

- Des matériaux de même type que ceux que nous avons utilisés pour les essais d'écoulement servent généralement en chantier. Suivant les résultats que nous avons obtenus ils peuvent être classés suivant le degré croissant de la difficulté à l'écoulement (en prenant en compte toutes les conditions de variations de la teneur en eau) :

- sable roulé de Loire 0/2
- sable broyé calcaire Tripleville 0/6 avec 10 % de fines
- sable broyé calcaire Tripleville 0/2 avec 15 % de fines
- sable broyé de Loire 0/2 avec 20 % de fines
- cendres volantes de Vitry-sur-Seine.

- Parmi les paramètres utilisés généralement pour caractériser les granulats dans le cadre de la fabrication des matériaux de chaussées notre analyse a permis de dégager ceux qui sont intéressants pour caractériser ces granulats vis-à-vis de l'écoulement. Il s'agit de la teneur en eau, de la teneur en fines, de l'indice de vides, de la taille maximale des grains, du temps d'écoulement à l'anglomètre, de la surface spécifique Blaine (pour les matériaux avec fines) et de la masse volumique vrac. Une analyse de ces paramètres combinés avec les propriétés d'écoulement du matériau permettrait de savoir comment ils agissent sur son écoulement. Nous le savons en ce qui concerne la teneur en eau et la masse volumique vrac suivant l'analyse effectuée au chapitre 3.

- bien que la validation du modèle théorique reste encore à poursuivre les résultats obtenus sont encourageants. Ainsi une règle de choix de la géométrie d'une trémie de dosage des granulats en fonction de leurs propriétés d'écoulement est proposée à la fin du chapitre 6.

3 - PERSPECTIVES D'AVENIR

A/ Notre approche théorique peut avoir une extension sur les points suivants :

- dimensionnement géométrique des silos à trémie. Il s'agit donc d'une trémie surmontée d'une super-structure verticale. En effet cette approche théorique peut prendre en compte une surcharge placée en haut de la trémie et qu'elle peut s'appliquer à des matériaux granulaires autres que les granulats.

- Etude des trémies à section rectangulaire symétriques et dissymétriques. Ce sont en effet les formes les plus courantes dans la pratique.

- approche de la répartition des contraintes sur la paroi en statique en considérant un état d'équilibre limite actif. Le cas des contraintes en dynamique est déjà traité dans ce travail en mettant à profit la connaissance du débit. La connaissance de ces contraintes peut paraître moins importante pour le cas d'une trémie de dosage néanmoins il faut quand même la dimensionner vis-à-vis des efforts exercés par le matériau.

B/ Etude de l'écoulement en cheminée

Notre modèle théorique peut prévoir si une cheminée va se former. Mais à partir du moment où celle-ci se crée il ne peut s'appliquer car le problème se transforme en une stabilité du matériau qui se trouve sur son pourtour.

Cette étude est importante car il arrive souvent dans la pratique que la cheminée devienne stable autrement dit rien ne s'écoule à travers celle-ci. L'objectif est donc de choisir une configuration adéquate de la trémie (notamment les dimensions de l'orifice) pour qu'à tout moment le matériau se trouve instable et s'écoule à travers la cheminée.

C/ Une étude impliquant la granularité des grains et valable pour les écoulements lents est d'une importance considérable aussi bien pour l'avance de la théorie sur les milieux granulaires que pour le dosage des granulats. En effet pour ce dernier cas au lieu d'agir sur la configuration de la trémie (souvent conditionnée par les contraintes d'exploitation) on agirait sur la composition des granulats pour faciliter l'écoulement.

D/ Souvent les contraintes d'exploitation sont déterminantes dans le choix de la configuration de la trémie de dosage. Cette configuration ne correspond pas toujours au cas idéal pour l'écoulement gravitaire des matériaux. Il faut donc se parer des problèmes qui se poseraient pendant l'écoulement lorsque ceux-ci sont difficiles. Dans ce cas il faut équiper la trémie d'un dispositif d'aide à l'écoulement dont nous avons décrit une liste dans le chapitre 1. En particulier pour les essais en trémie réelle nous avons utilisé des vibreurs et un VE de décharge. A notre avis, pour pouvoir utiliser à bon escient ces équipements, notamment le vibreur, il faut mener des études à la fois sur le plan théorique et expérimental.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ACI STANDARD - 1975 - Recommended practice for design and construction of concrete bins, silos, and bunkers for storing granular materials, ACI Journal, pp 529-548
- [2] AHMADI G. - 1983 - A generalized continuum theory for flow of granular materials, trans tech publications, vol 2, pp 497-527
- [3] ANNALES ITBTP - 1986 - Règles professionnelles de conception et de calcul des silos en béton armé ou précontraint, n° 446, série : béton 240
- [4] AOUICHAT Mohammed - 1988 - Approche quasi statique discrète de l'écoulement gravitaire des matériaux granulaires, Thèse de Docteur Ingénieur INSA de Rennes
- [5] ARNOLD P.C., MC LEAN A.G. and ROBERTS A.W. - 1981 - The design of storage bins for bulk solids handling, bulk solids handling, vol 1, n° 1
- [6] BAGNOLD R.A. - 1954 - Experiments on a gravity-free dispersion of large spheres in newtonian fluid under shear, Prod. Roy. Soc. London A 225, pp 49-63
- [7] BAGNOLD R.A. - 1966 - The shearing and dilatation of dry sand and the singing mechanism, Proc. Roy. Soc. London, A295, pp 219-232
- [8] BAROUX R., FAURE M. et WAUQUIER P. - 1982 - Fonctionnement et évolution des centrales d'enrobage, Bulletin de Liaison des L.P.C. spécial XII
- [9] BEVERLOO W.A., LENIGER H.A., and VAN DE VELDE J. - 1961 - Chem. Eng. Sci., 15, p 260
- [10] BEYNET J.M., TRAMPCZYNSKI W., Application de la stéréophotogrammétrie à la mesure de déplacements et à l'étude de l'écoulement des matériaux, Matériaux et Construction, vol 10, n° 39
- [11] BOYER Y. - 1966 - Transporteurs continus pour produits en vrac, Technique de l'Ingénieur, A 966
- [12] BRANSBY P.L, BLAIR-FISH P.M. - 1975 - Initial deformations during mass flow from a bunker : observations and idealisations, Powder Tech., 11, pp 273-288
- [13] BROWN R.L. - 1961 - Minimum energy theorem for flow of dry granules through apertures, Nature, Lond, 191, pp 458-461
- [14] BROWN R.L., RICHARDS J.C - 1965 - Kinematics of the flow of dry powders and bulk solids, Rheologica acta, n° 153
- [15] CHATLYNNE C.J., RESNICK W. - 1973 - Determination of flow patterns for unsteady state flow of granular materials, Powder Tech., 8, pp 177-182
- [16] CHICKWENDU S.C. - 1982 - Probabilistic stresses in granular media, proc. abs. 19th SESI conf, Rolla, MO, p 309

- [17] COULOMB C.A. - 1776 - "Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique, relatif à l'architecture", Mémoire de math de l'Académie Royale des Sciences (Paris), 7, p 343
- [18] COWIN S.C. - 1974 - , a) Powder Tech, 9, pp 61-69
- [19] COWIN S.C. - 1974 - b) Acta mechanica, 20, pp 41-46
- [20] CUNDALL P.A., STRACK O.D.L - 1979 - A discrete numerical model for granular assemblies - Geotechnique 29, n° 1, pp 47-65
- [21] CUTRESS J.O., PULFER R.F. - 1967 - X-ray investigations of flowing powders, Powder Tech., 1, pp 213-220
- [22] DALMASSO C. - 1986 - Vidange des silos : comment et avec quels appareils peut-on faciliter l'écoulement ?, Info-vrac, bimestriel Aout-sept n° 28, pp 79-82
- [23] DAVIDSON J.F. and NEDDERMAN R.M. - 1973 - The hour-glass theory of hopper flow, Trans. Int. Chem. Engrs., 51, p 29
- [24] DRESHER A. and DE JOSSELIN DE JONG - 1972 - Photoelastic verification of a mechanical model for the flow of a granular material, J. Mech. Phys. solids, vol 20, pp 337-351
- [25] DRUCKER D.C., PRAGER W. and GREENBERG H.I. - 1952 - Extended limit design theorems for continuous media, Quart. Appl. math., 9, p 381
- [26] DRUCKER D.C. and PRAGER W. - 1952 - Soils mechanics and plastic analysis of limit design, Quart. appl. math., vol 10, pp 157-165
- [27] ENSTAD G. - 1975 - On the theory of arching in mass flow hoppers, Chem. eng. sci, vol 30, pp 1273-1283
- [28] GARDNER G.C. - 1963 - The "best" hopper profile for cohesive material, Chem. Eng. sci., vol 18, p 35
- [29] GARDNER G.C. - 1966 - The region of flow when discharging granular materials from bin-hopper systems, Chem. Eng. Sci., vol 21, pp 261-273
- [30] GOODMAN M.A. and COWIN S.C - 1971 - Two problems in the gravity flow of granular materials, J. Fluid Mech., vol 45, part 2, pp 321-339
- [31] GOODMAN M.A. and COWIN S.C. - 1972 - A continuum theory for granular materials, Arch. National Mech. Anal., vol 44
- [32] HAAR A. and VON KARMAN T. - 1909 - Nachrichten von der K. Gesellschaft Zu Göttingen, Math-physik klasse
- [33] HILL R. - 1950 - The mathematical theory of plasticity, Clarendon Press, (Oxford)

- [34] HORNE R.M. - 1976 - Theoretical analysis of stress distributions in bin and hoppers, Ph. D. Thesis, University of Cambridge
- [35] HORNE R.M. and NEDDERMAN R.M. - 1976 - An analysis of the stress distribution in two-dimensionnal bins by the method of characteristics, Powder Tech., vol 14, pp 93-102
- [36] JANSSEN H.A - 1895 - Versuche uber Getreidedruck in silozellen, Z. Ver. dt. Ing., 39, p 1045
- [37] JENIKE A.W. - 1961 - Gravity flow of bulk solids, Bulletin 108, Utah Eng. Exper. Station, University of Utah
- [38] JENIKE A.W. - nov 1964 - Storage and flow of solids, bulletin n° 123, Utah Eng. Exper. Station, University of Utah
- [39] JENIKE A.W. and JOHANSON J.R. - 1968 - Bin Loads, J. of structural division PASCE, pp 1011-1036
- [40] JENIKE A.W. and JOHANSON J.R. - 1969 - On the theory of bin loads, Jour. of Eng. for Industry, Trans. ASME, series B
- [41] JENIKE A.W., JOHANSON J.R, CARSON J.W - 1973 - Bin loads part 2 : Concepts, Jour. of Eng. Ind., trans ASME, pp 1-5
- [42] JENIKE A.W., JOHANSON J.R, CARSON J.W - 1973 - Bin loads part 3 : mass flow bins, Jour. of Eng. Ind., trans ASME, pp 6-12
- [43] JENIKE A.W., JOHANSON J.R and CARSON J.W. - 1973 - Bin loads part 4 : Funnel-flow bins, Jour. of Eng. for Ind.,trans ASME, pp 13-16
- [44] JENKINS J.T - 1975 - Static equilibrium of granular materials, J. Appl. Mech., 42, p 603
- [45] JOHANSON J.R. - 1965 - Method of calculating rate of discharge from hoppers and bins, Trans. Soc. of Min. Engrs., AIME, vol 232, pp 69-80
- [46] JOHANSON J.R - 1969 - Feeding, Chem. eng.
- [47] KAMGEU V. - 1979 - Contribution à l'étude del'écoulement des matériaux pulvérulents ensilés, thèse de Docteur ingénieur, INSA de Rennes
- [48] KITAMURA R. - 1981 - A mechanical model of particulate material based on stochastic process, Soils and Foundations, vol 21, n° 2, pp 63-72
- [49] KÖTTER F. - 1903 - Die bestimmung des Druckes an gekrummten Gleitflächen, eine Aufgabe aus der Lehre Vom Eiddruck, Akad. Berichte, Berlin
- [50] KURZ H.P. - 1975 - Allgemeine Ähnlichkeitsgesetze der pneumatischen siloentleerung und Messergebnisse über den geometrieeinfluss auf die fliessvorgänge, Aufbereitungs-technik, n° 11

- [51] LATINCSICS N.K. - 1986 - Silos and storage vessels : influence of compressibility of the stored solids on the design methods, the process and conflicts in existing codes, Bulk solids handling, n° 1
- [52] LENCZNER D., - 1966 - Cohesive arching of bulk materials in bunkers and silos, Civil Eng. and public works review, Transactions of the ASME, pp 13-16
- [53] LEPERT P. - 1987 - Projets silos métalliques, n° 1, communication privée
- [54] LEPERT P. - 1988 - Projets silos métalliques, n° 2, communication privée
- [55] LEPERT P., RANAIVOSON D., GOURDON J.L - 1989 - Centrifuge modelling of the flow of a granular medium, "Powder and grains" conference, Clermont-Ferrand
- [56] LITWINISZYN J. - 1956 - Applications of the equation of stochastic processes to mechanics of loose bodies, Arch. Mech. Stos., vol 8, n° 4, pp 393-411
- [57] LUMBROSO - 1977 - Bases scientifiques du calcul des enceintes renfermant des massifs pulvérulants et du calcul des silos. Annales ITBTP, n° 346
- [58] MARGARITA E.E. - 1983 - Some mathematical models of snow avalanches, Trans. Tech. Publications, vol 2, pp 577-588
- [59] MARSAL R.J. - 1965 - Stochastic processes in the grain skeleton of soils, Proc 6th ICSMFE, vol 1, Div 1-2, pp 303-307
- [60] MASUDA H, YOSHIDA H. and LINOYA K - 1983 - Simulation of solid particle motion in turbulent gas-solid pipe flow and related topics, Trans. Tech. publications, vol 2, pp 589-600
- [61] MC CABE - 1974 - Flow patterns in granular material in circular bins, Geotechnique n° 1, pp 45-62
- [62] MC LEAN A.G. - 1979 - Flow rate of simple bulk solids from mass flow bins, Ph. D. Thesis, the University of Wollongong
- [63] MC LEAN A.G. - 1985 - Initial stress fields in converging channels, bulk solids handling, vol 5, n° 2
- [64] MOLERUS O. - 1975 - Theory of yield of cohesive powders, Powder Tech., 12, pp 259-275
- [65] MOLERUS O. - 1978 - Effect of interparticle cohesive forces on the flow behaviour of powders, Powder Tech., 20, pp 165-175
- [66] MULLINS W.W. - 1974 - Experimental evidence for the stochastic theory of particle flow under gravity, Powder tech., vol 9, n° 1, pp 29-37
- [67] NEDDERMAN R.M. and TÜZÜN U. - 1979 - A kinematic model for the flow of granular materials, Powder Tech., 22, p 243
- [68] PARISEAU W.G. - 1969 - Discontinuous velocity fields in gravity flows of granular materials through silos, Powder Tech., 3, pp 218-226

- [69] PERRY M.G, ROTHWELL E., WOODFIN W.T - 1975 - Model studies in mass-flow bunkers. Development of the radio-pill technique for dynamic pressure and velocity measurements, Powder Tech., 12, pp 51-56
- [70] PEYBERNARD J., LEBAS M. et CARTA V. - 1981 - Méthode de traitement des enregistrements de mesure de densité en continu, Bulletin de Liaison des LPC, n° 114
- [71] RADEMACHER F.J.C - 1982 - Reclaim power and geometry of bin interfaces in belt and apron feeders, vol 2, n° 2
- [72] RADIOISOTOPES I - 1966 - Bulletin des LPC, spécial G
- [73] RADIOISITOPES II - 1970 - Bulletin des LPC, spécial P
- [74] RANAIVOSON D. - 1986 - Etude du dosage des matériaux granulaires, DEA, ENSM Nantes, présenté au LCPC
- [75] RANAIVOSON D. - 1987 - Le phénomène d'écoulement, Journée de Physique des Arcs, Bulletin de Liaison des LPC, spécial XV, pp 38-43
- [76] REED A.R and DUFFEL C.H. - 1983 - A review of hopper discharge aids, bulk solids handling, vol 3, n° 1
- [77] REIMBERT A. et REIMBERT M. - 1971 - Silos : théorie et pratique, 5ème édition. Eyrolles, Paris
- [78] RICHMOND O. and GARDNER G.C. - 1962 - Limiting spans for arching of bulk materials in vertical channels, Chem. Eng. Sci., vol 17, pp 1071-1078
- [79] RICHMOND O. - 1963 - Gravity hopper design, Mech. Eng., vol 85, p 46
- [80] SAVAGE S.B - 1965 - The mass flow of granular materials derived from coupled velocity-stress fields, Brit. J. Appl. Phys., vol 16
- [81] SAVAGE S.B - 1979 - Gravity flow of cohesionless granular materials in chutes and channels, J. Fluid. Mech., vol 92, part 1, pp 53-96
- [82] SCHWEDES J. - 1983 - Evolution of bulk solids technology since 1974, Bulk solids handling, vol 3, n° 1
- [83] SHAHINPOOR M. - 1983 - Some recents results on the behaviour of granular materials, Trans. Tech. publications, vol 1, pp 297-321
- [84] SHAHINPOOR M. and AHMADI G - 1983 - A kinetic theory for rapid flow of rough inelastic spherical particles and the evolution of fluctuations, Trans. Tech. publications, vol 2, pp 641-667
- [85] SOKOLOVSKI V.V. - 1965 - Statics of granular media, Pergamon Press (Oxford)
- [86] STAINFORTH P.T. and ASHLEY R.C. - 1973 - An analytical hopper design method for cohesive powders, Powder Tech 7, pp 215-243

- [87] TAKAHASHI H. and YANAI H. - 1974 - On the converging flow of granular solids discharged from a moving bed system- prédiction of dead zone and some consideration, Kagaku Kôgaku, 38, pp 746-751
- [88] TERZAGHI K. - 1936 - Stress distribution in dry and in saturated sand above a yielding trap-door , Proc. Int. conf. Soil Mech., Cambridge Mass vol 1, pp 307-311
- [89] TORCHET B., OUDIN J., CHATEAU E., BENABEN J.P. - 1982 - Les matériels de dosage des granulats, des fines et des liants, Bul. Liaison LPC, spécial XII, pp 107-120
- [90] TÜZÜN U - 1979 - Velocity distributions in funnel-flow bins, Ph. D. Thesis, University of Cambridge
- [91] WALKER D.M. - 1966 - An approximate theory of pressure and arching in hoppers, Chem. Eng. Sci., vol 21, pp 975-997
- [92] WALTER J.K - 1973 - A theoretical analysis of stresses in axially summetric hoppers and bunkers, Chem. Eng. Sci, vol 28, pp 779-789
- [93] WILLIAMS J.C - 1977 - The rate of discharge of coarse granular materials from conical mass flow hoppers, Chem. Eng. Sci., vol 32, pp 247-255
- [94] WILMS H. ans SCHWEDES J. - 1985 - Interpretation of ring shear tests, Bulk solids handling, vol 5, n° 5

ANNEXE A

**DETERMINATION DES EFFORTS MOBILISES DANS LA ZONE
D'EXTRACTION**

A.1 - NOTATIONS ET DEFINITIONS

La figure a.1 représente une coupe de la trémie montrant le plan de rupture (AB) et le tapis extracteur (AC). La figure a.2. schématise le matériau situé entre ces derniers (Σ_1 et ASUR). Cette figure montre aussi la surface Σ_2 qui frotte sur les joues latérales. Les paramètres connus sont θ_p , α , D et e qui désignent respectivement l'angle d'inclinaison de la paroi par rapport à la verticale, l'angle d'inclinaison du tapis par rapport à l'horizontale, la dimension à la base de la trémie et l'épaisseur de veine de matériau (prise égale à l'ouverture de trappe A). On va exprimer en fonction de ces quatre paramètres les différentes notations utilisées dans la détermination des efforts mobilisés dans la zone d'extraction.

a - EXPRESSION DE L

Sur la figure A.1 notons $L_{\min}$ la valeur minimale de L correspondant à une ouverture de trappe nulle.

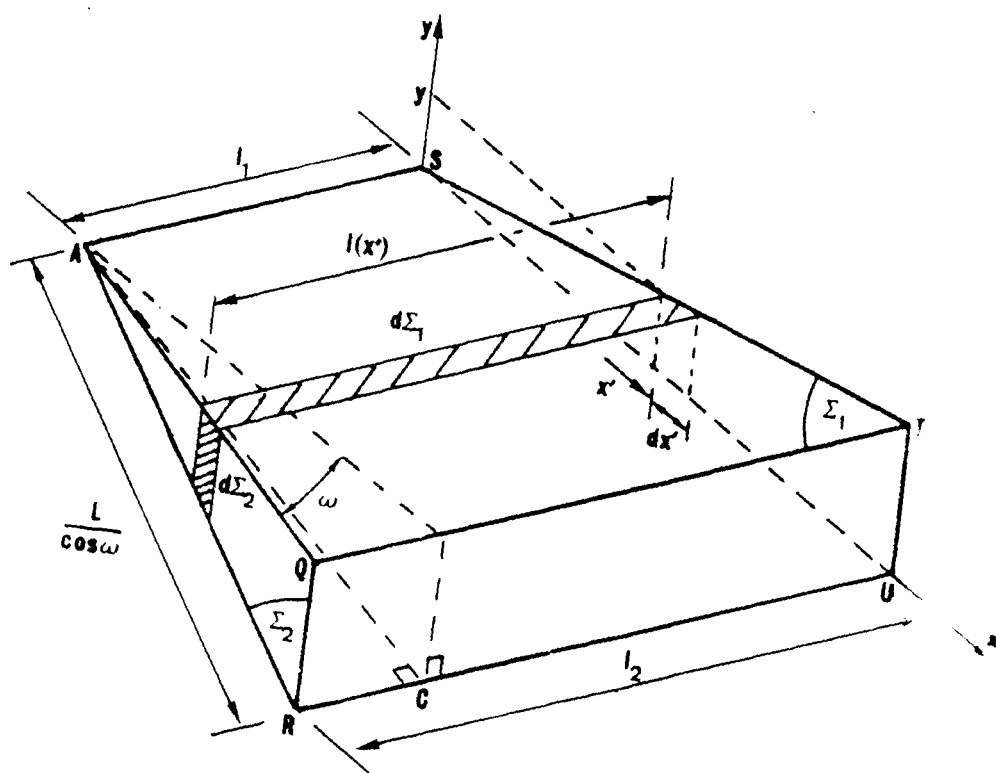
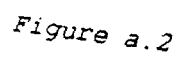
$$\left\{ \begin{array}{l} L_{\min} = AW = JW - JA \\ \quad = 2XW[\cos\alpha - \sin\alpha \tan(\theta_p - \alpha)] \\ L_{\min} = 2 \left[\frac{D}{2} - \frac{e \sin\theta_p}{\cos(\theta_p + \alpha)} \right] \frac{\cos\theta_p}{\cos(\theta_p - \alpha)} \\ L = L_{\min} + WC = L_{\min} + e \tan(\theta_p + \alpha) \\ \boxed{L = 2 \left[\frac{D}{2} - \frac{e \sin\theta_p}{\cos(\theta_p + \alpha)} \right] \frac{\cos\theta_p}{\cos(\theta_p - \alpha)} + e \tan(\theta_p + \alpha)} \end{array} \right. \quad (a.1)$$

b - EXPRESSION DE λ

$$\lambda = \arctan\left(\frac{e}{L}\right) + \alpha \quad (a.2)$$

Les valeurs de λ ne dépassent pas celle de l'angle de frottement interne effectif φ_e car au-delà de cette valeur le matériau ne peut que s'écrouler, donc la ligne de rupture ne peut pas se maintenir.

$$\lambda_{\max} = \varphi_e$$



c - EXPRESSIONS DE z_1 , u_1 , z_0 , u_0

sur la figure a.1 :

$$z_1 = AN \cot \theta_p$$

$$z_1 = \frac{1}{2} \frac{e}{\sin(\lambda - \alpha)} \frac{\cos(\lambda + \theta_p)}{\sin \theta_p} \quad (\text{a.3})$$

On pose :

$$u_1 = \frac{z_1}{e} \quad (\text{a.4})$$

$$z_0 = z_1 + EN$$

$$z_0 = \frac{1}{2} \frac{e}{\sin(\lambda - \alpha)} \frac{\cos(\lambda + \theta_p)}{\cos \theta_p} (\cot \theta_p + \tan \lambda) \quad (\text{a.5})$$

On pose :

$$u_0 = z_0 / e \quad (\text{a.6})$$

d. EXPRESSIONS DE r , z , y

Sur la figure a.1 :

$$r = OH + HF$$

$$r = z_0 \frac{\cos \lambda}{\cos(\lambda - \theta)} \quad (\text{a.7})$$

$$z = r \cos \theta \quad (\text{a.8})$$

$$y = FG$$

$$y = (z - z_1) \frac{\sin(\lambda - \alpha)}{\sin \lambda} \quad (\text{a.9})$$

e. EXPRESSIONS DE x' , l_1 , l_2 , $l(x')$, ω

Sur la figure a.2 :

$$l_1 = AV = AM - VM$$

$$l_1 = \frac{2e \cos \lambda}{\sin(\lambda - \alpha)} - D \quad (a.10)$$

$$l_2 = D \quad (a.11)$$

$$l(x') = \frac{l_2 - l_1}{L} x' \cos \omega + l_1 \quad \text{pour } m = 1$$

$$l(x') = l_1 \quad \text{pour } m = 0$$

$$l(x') = (2z \tan \theta_p)^m l_1^{1-m} \quad (a.12)$$

$$\omega = \arctan \left(\frac{l_2 - l_1}{2L} \right) \quad (a.13)$$

$$x' = y / \cos \omega \tan(\lambda - \alpha) \quad (a.14)$$

f - EXPRESSIONS DE I_1 , I_2 , I_3 , I_4 , I_5 ET I_6

Pour les calculs ci-dessous il est parfois utile d'effectuer le changement de variable :

$$u = \lambda - \theta$$

$$du = - d\theta$$

$$I_1 = \int_{-\theta_p}^{\theta_p} \frac{\cos \theta d\theta}{\cos^3(\lambda - \theta)}$$

$$I_1 = [\tan(\lambda + \theta_p) - \tan(\lambda - \theta_p)] \cos \lambda + \frac{\sin \lambda}{2} [\tan^2(\lambda + \theta_p) - \tan^2(\lambda - \theta_p)] \quad (a.15)$$

$$I_2 = \int_{-\theta_p}^{\theta_p} \cos^2(\lambda - \theta) \cos \theta d\theta$$

$$I_2 = \frac{\cos^2 \lambda}{4} \left[\frac{2}{3} \sin 3\theta_p + 6 \sin \theta_p + \frac{2}{3} \sin^2 \lambda \sin^3 \theta_p \right] \quad (a.16)$$

$$I_3 = \int_{-\theta_p}^{\theta_p} \cos \theta d\theta$$

$$I_3 = 2 \sin \theta_p \quad (a.17)$$

$$I_4 = \int_{-\theta_p}^{\theta_p} \frac{\cos^2 \theta}{\cos(\lambda - \theta)} d\theta$$

$$I_4 = 2\cos\lambda \sin\theta_p + \frac{\sin^2 \lambda}{2} \text{Log} \left[\frac{\cos\lambda + \sin\theta_p}{\cos\lambda - \sin\theta_p} \right]^2 \quad (\text{a.18})$$

$$I_5 = \int_{-\theta_p}^{\theta_p} \frac{\cos^2 \theta}{\cos^4 \lambda - \theta} d\theta$$

$$I_5 = \cos^2 \lambda [\tan(\lambda + \theta_p) - \tan(\lambda - \theta_p)] + \frac{\sin^2 \lambda}{3} [\tan^3(\lambda + \theta_p) - \tan^3(\lambda - \theta_p)] \\ + \frac{\sin 2\lambda}{2} [\tan^2(\lambda + \theta_p) - \tan^2(\lambda - \theta_p)] \quad (\text{a.19})$$

$$I_6 = \int_{-\theta_p}^{\theta_p} \cos^2 \theta \cos(\lambda - \theta) d\theta$$

$$I_6 = \frac{\cos \lambda}{2} \left[\frac{\sin 3\theta_p}{3} + 3\sin\theta_p \right] \quad (\text{a.20})$$

A.2 - DETERMINATION DE LA CHARGE EXERCEE PAR LE CONTENU DE LA TREMIE

D'après 2.4.1.2 la charge F au tapis due au matériau s'écrit :

$$F = \int_{\Sigma_1} dF = \int_{\Sigma_1} \sigma_{v0}(\theta) d\Sigma_1$$

avec

$$\sigma_{v0}(\theta) = \frac{2}{k+1} \sigma_a \cos \theta$$

d'une part, la contrainte σ_a , formulée par (2.43), peut se mettre sous la forme :

$$\sigma_a = \rho g (Ar + Br^{-2(m+1)}) \quad m = 0, 1$$

avec

$$A = \frac{x}{\rho p (P+1) \cos \theta_p} \frac{h_1(u)}{h_2(u)} \quad (\text{a.21})$$

$$B = \left(\frac{3}{2\pi}\right)^{2m} \frac{q^2 Y (1 - \cos^{3/2} \theta_p)^{-2m}}{4\rho^3 g (P-2m-2) (1J)^{(2-2m)}} \frac{1}{h_2(u)} \quad (\text{a.22})$$

X, Y et Z s'obtiennent par (2.25) ou (2.22) suivant que la paroi est lisse ou non. $h_1(u)$ et $h_2(u)$ figurent dans (2.26). Le cas défavorable à prendre en compte pour le dimensionnement du dispositif de dosage correspond à une trémie pleine c'est-à-dire à la valeur de u faible. Ceci permet d'éliminer les termes $h_1(u)$ et $h_2(u)$ qui tendent alors vers 1.

D'autre part l'élément de surface $d\Sigma_1$ s'écrit

$$d\Sigma_1 = l(x') \frac{dz}{\tan \lambda}$$

avec

$$dz = - \frac{r^2 \tan \lambda}{z_0} d\theta$$

d'après (a.7) et (a.8)

Compte-tenu de l'expression (a.7) de r , dF devient maintenant :

$$dF = \frac{-2}{k+1} (2 \tan \theta_p)^m l^{1-m} \left[\begin{aligned} & A z_0^{2+m} \cos^{3+m} \frac{\cos^{1+m} \theta}{\cos^{3+m} (\lambda - \theta)} \\ & + \frac{B}{z_0^{m+1} \cos^m \lambda} \cos^m (\lambda - \theta) \cos^{1+m} \theta \end{aligned} \right] d\theta$$

donc :

$$F = - \int_{-\theta_p}^{\theta_p} dF$$

Pour intégrer dF il convient de distinguer les cas $m=0$ et $m=1$. On obtient finalement :

$$F = \rho g e^{2+m} l^{1-m} H \quad (a.23)$$

avec

$$H = \begin{cases} \frac{2}{k+1} \left(A I_1 u_0^2 \cos^3 \lambda + \frac{B I_3}{e^3 u_0} \right) & \text{pour } m=0 \\ \frac{4 \tan \theta_p}{k+1} \left(A I_5 u_0^3 \cos^4 \lambda + \frac{B I_6}{e^5 u_0^2 \cos \lambda} \right) & \text{pour } m=1 \end{cases}$$

A et B sont définis par (a.21) et (a.22)

I_1 , I_3 , I_5 , et I_6 sont définis par (a.15), (a.17), (a.19) et (a.20)

u_0 et u_1 se calculent à partir de (a.6) et (a.4), λ figure dans (a.2).

A.3 - DETERMINATION DE LA FORCE DE FROTTEMENT SUR LES JOUES LATÉRALES

D'après 2.4.1.3 la force de frottement K sur les joues latérales s'écrit :

$$K = \int_{\Sigma_2} dK = \int_{\Sigma_2} 2\sigma_{HK}\mu_k y dx'$$

avec

$$\sigma_{HK} = \frac{1}{k} (\sigma_{v0}(\theta) + \frac{\rho g y}{2 \cos \alpha})$$

et

$$\begin{aligned} \sigma_{v0}(\theta) &= \frac{2}{k+1} \sigma_a \cos \theta \\ &= \frac{2}{k+1} [Ar + Br^{-2(l+m)}] \cos \theta \end{aligned}$$

A et B sont définis par (a.21) et (a.22).

Compte-tenu de l'expression (a.14) de x' , dK s'écrit

$$dK = \frac{2\rho g \mu_k}{k} \left\{ \frac{\tan^2(\lambda - \alpha) \cos^2 \omega}{2 \cos \alpha} x'^2 dx' + \frac{\tan(1 - \alpha)}{\cos \omega} [Ar + Br^{-2(l+m)}] \cos \theta y dy \right\}$$

Le premier des deux termes entre accolades s'intègre facilement en x' qui varie de 0 à $L/\cos \omega$. Pour intégrer le second terme il convient d'exprimer y et dy en fonction de θ en utilisant les relations (a.9), (a.8) et (a.7).

Le second terme peut alors s'écrire :

$$''2'' = \frac{2\sin 2(1-\alpha)}{(k+1)\sin 2\lambda \cos \omega} \left\{ \begin{aligned} & -Az_0^3 \frac{\cos^3 \theta}{\cos^4(\lambda-\theta)} d\theta + Az_1 z_0^2 \frac{\cos \theta}{\cos^3(\lambda-\theta)} d\theta \\ & - \frac{B}{z_0^{2m}} \frac{\cos^2 \theta}{\cos^{(1-2m)}(\lambda-\theta)} d\theta \end{aligned} \right\}$$

L'expression finale de K obtenue après intégration s'écrit :

$$K = \rho g e^{2+m} l^{1-m} Z \quad (a.24)$$

dans laquelle

$$Z = \left(\frac{e}{l}\right)^{1-m} \frac{2\mu_k}{k} \left[\frac{-1}{6 \tan(\lambda-\alpha) \cos \alpha \cos \omega} + \frac{2 \sin 2(\lambda-\alpha) G}{(k+1) \cos \omega \sin 2\lambda} \right]$$

avec

$$G = \begin{cases} AI_5 u_0^3 \cos^4 \lambda - AI_1 u_0^2 u_1 \cos^3 \lambda + \frac{BI_5}{e^5 u_0^2 \cos \lambda} - \frac{BI_2 u_1}{e^5 u_0^3 \cos^2 \lambda} & \text{pour } m=1 \\ AI_5 u_0^3 \cos^4 \lambda - A u_0^2 u_1 \cos^3 \lambda + \frac{BI_4 \cos \lambda}{e^3} + \frac{B u_1 I_3}{e^3 u_0} & \text{pour } m=0 \end{cases}$$

I_1 à I_6 sont définis dans A.1.1 - f

A et B se calculent par (a.21) et (a.22)

λ a pour expression (a.2)

u_0 et u_1 sont définis par (a.6) et (a.4)

A.4 - DETERMINATION DU POIDS DU MATERIAU ENTRE LE TAPIS ET LE PLAN DE RUPTURE

- Pour $m=0$, le volume du massif décrit par la figure (a.2) s'écrit :

$$V_m = \frac{1e^2}{2\tan(\lambda-\alpha)}$$

- Pour $m=1$, le volume du massif décrit par la figure a.2 s'écrit :

$$V_m = \frac{1}{2} \left[\frac{L}{6} 2e(2l_2 + l_1) \right]$$

$$V_m = \frac{e^3}{6\tan(\lambda-\alpha)\sin(\lambda-\alpha)} \left[4\cos\lambda - \frac{\cos(\lambda+\theta_p)}{\cos\theta_p} \right]$$

Le poids du massif s'écrit alors :

$$W = \rho g e^{2+\lambda m} l^{1-m} V \quad (a.25)$$

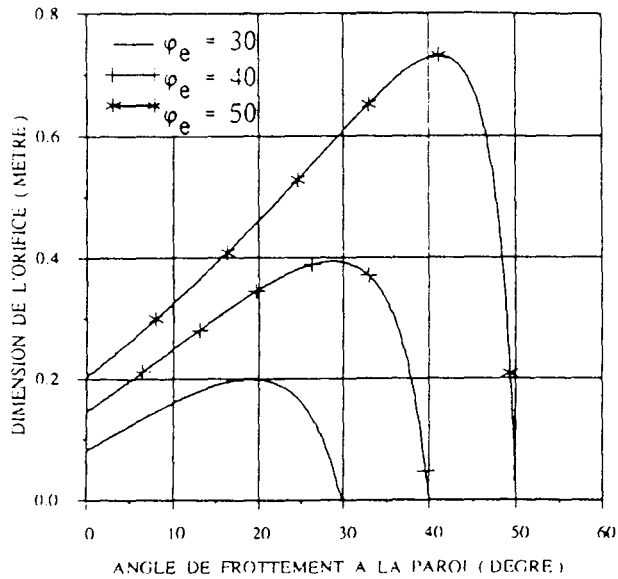
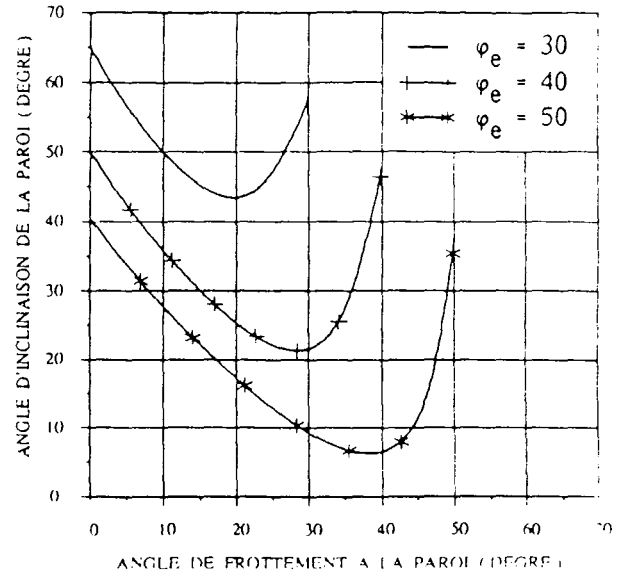
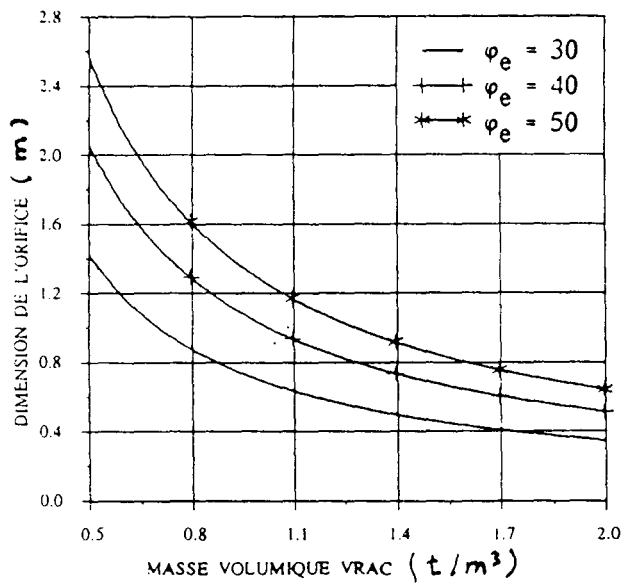
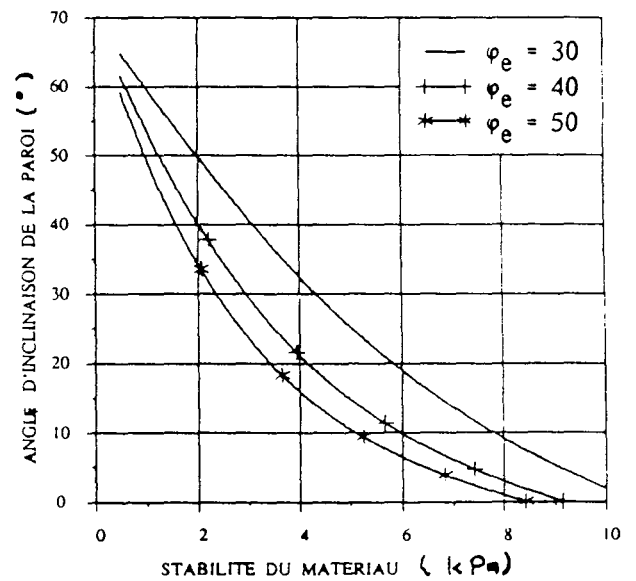
avec :

$$V = \begin{cases} \frac{1}{2\tan(\lambda-\alpha)} & \text{pour } m = 0 \\ \frac{1}{6\tan(\lambda-\alpha)\sin(\lambda-\alpha)} \left[4\cos\lambda - \frac{\cos(\lambda+\theta_p)}{\cos\theta_p} \right] & \text{pour } m = 1 \end{cases}$$

λ est défini par (a.2)

ANNEXE B
RESULTATS COMPLEMENTAIRES SUR LA PREDICTION DES
DIMENSIONS
D'UNE TREMIE ET DU DISPOSITIF DE DOSAGE

Figure b.1 - Géométrie d'une trémie pour l'écoulement en masse critique

a) $m = 0$ b) $m = 0$ c) $m = 1$ d) $m = 1$

Les valeurs des paramètres sont indiquées sur les figures lorsqu'ils varient sinon ils prennent les valeurs suivantes :

$$\theta_p = 30^\circ$$

$$\sigma = 1.5 \text{ t/m}^3$$

$$\phi_p = 20^\circ$$

$$\sigma_c = 4 \text{ kPa}$$

$$D = 0.5 \text{ m}$$

$$h = 2 \text{ m}$$

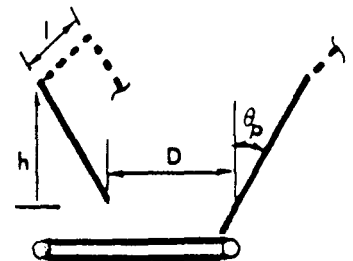


Figure b.2- Frottement effectif matériau-tapis

Les paramètres qui ne varient pas prennent les valeurs suivantes (sinon leurs valeurs sont indiquées sur les figures):

$$v_t = 0.25 \text{ m/s}$$

$$h = 2 \text{ m}$$

$$\theta_D = 30^\circ$$

$$A = 0.25 \text{ m}$$

$$D = 0.5 \text{ m}$$

$$\varphi_D = 25^\circ$$

$$\alpha = 10^\circ$$

$$\rho = 1.5 \text{ t/m}^3$$

$$\varphi_c = 40^\circ$$

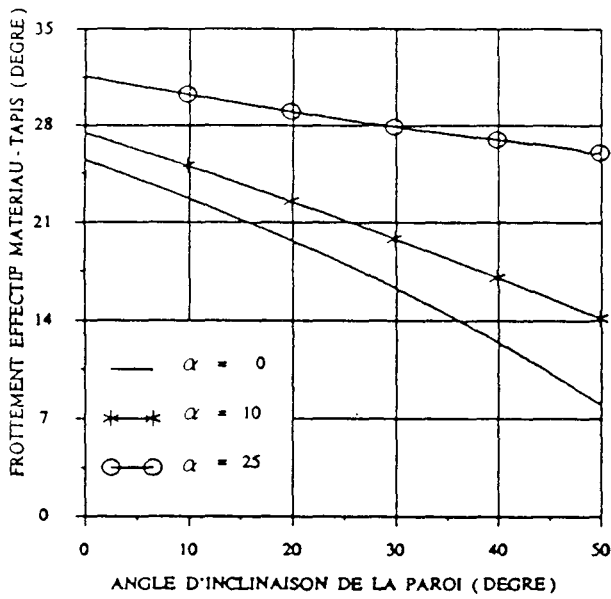
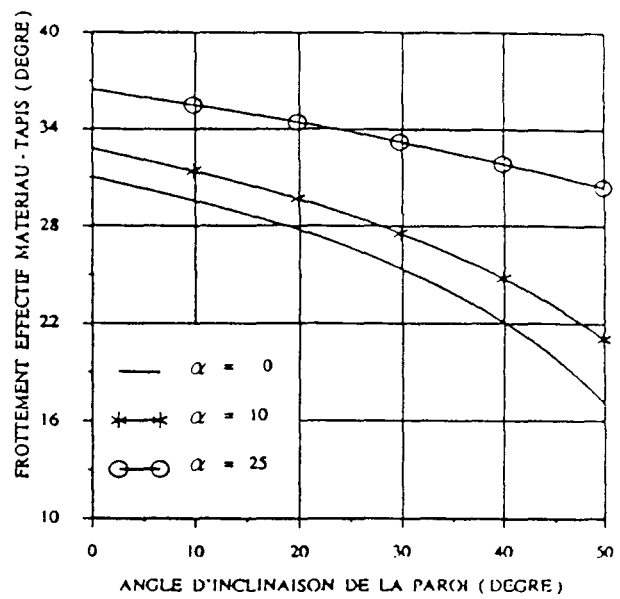
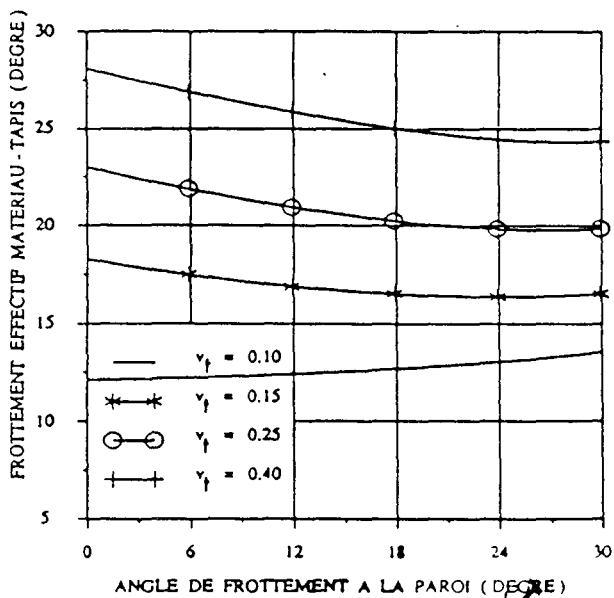
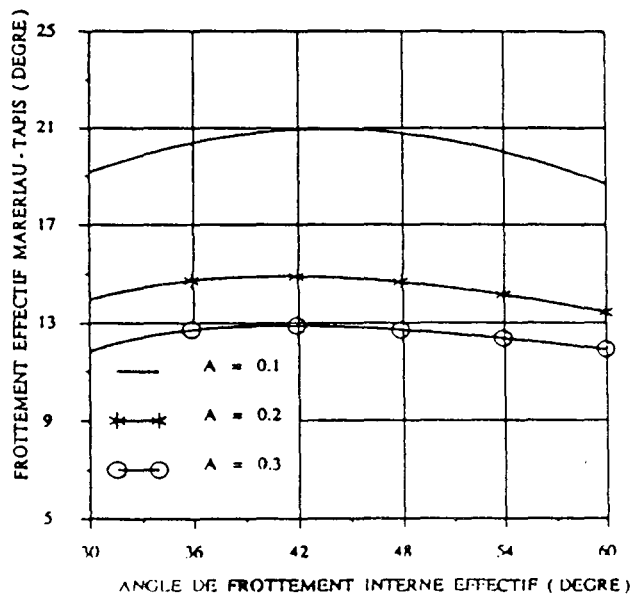
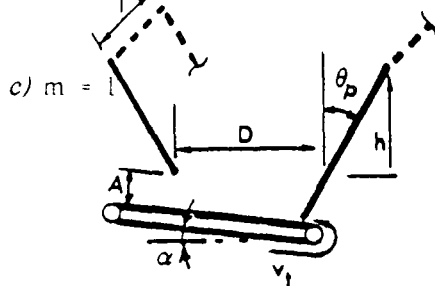
a) $m = 1$ b) $m = 0 ; l = 0.5 \text{ m}$ c) $m = 1$ d) $m = 1$ 

Figure b.3 - Energie spécifique

Les paramètres qui ne varient pas prennent les valeurs suivantes (sinon leurs valeurs sont indiquées sur les figures):

$$v_t = 0.25 \text{ m/s}$$

$$h = 2 \text{ m}$$

$$\theta_p = 30^\circ$$

$$A = 0.25 \text{ m}$$

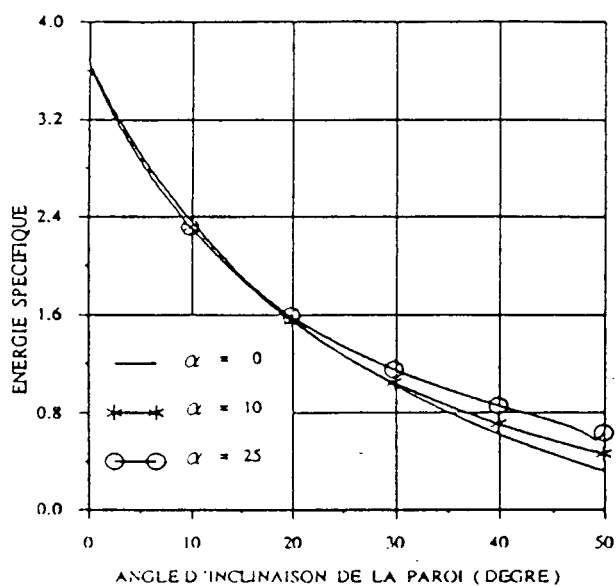
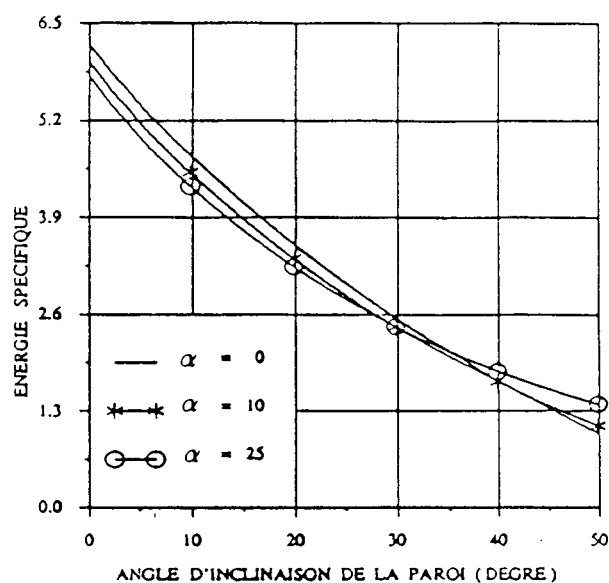
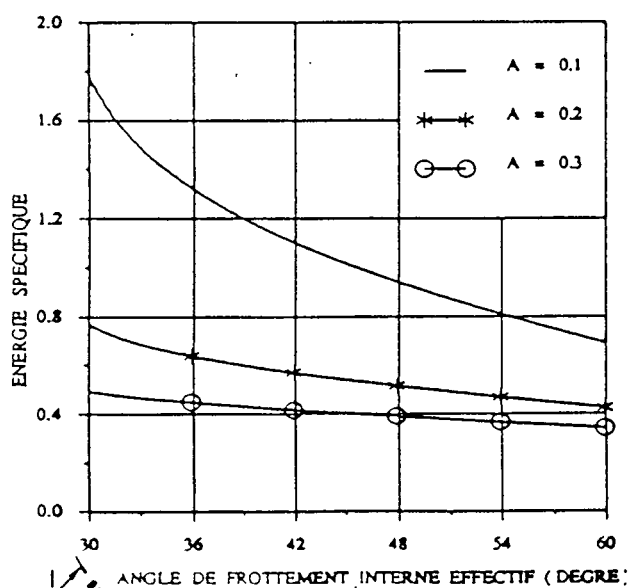
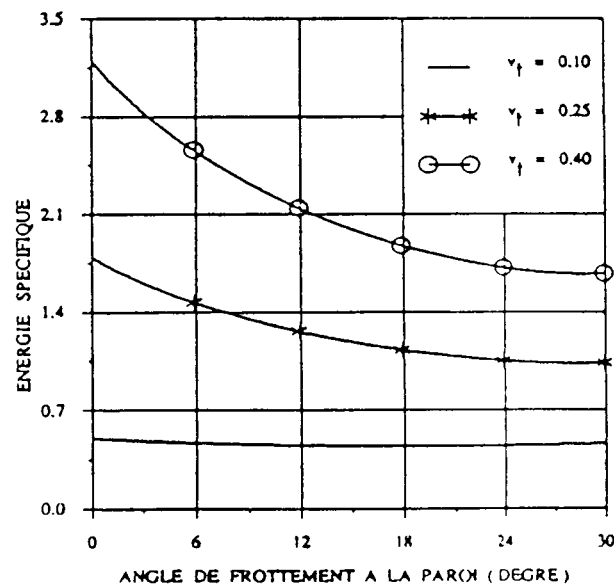
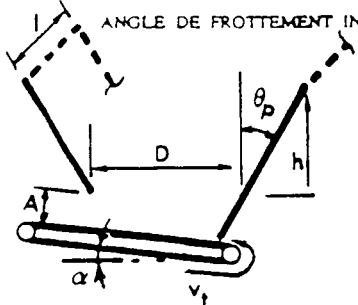
$$D = 0.5 \text{ m}$$

$$\varphi_p = 25^\circ$$

$$\alpha = 10^\circ$$

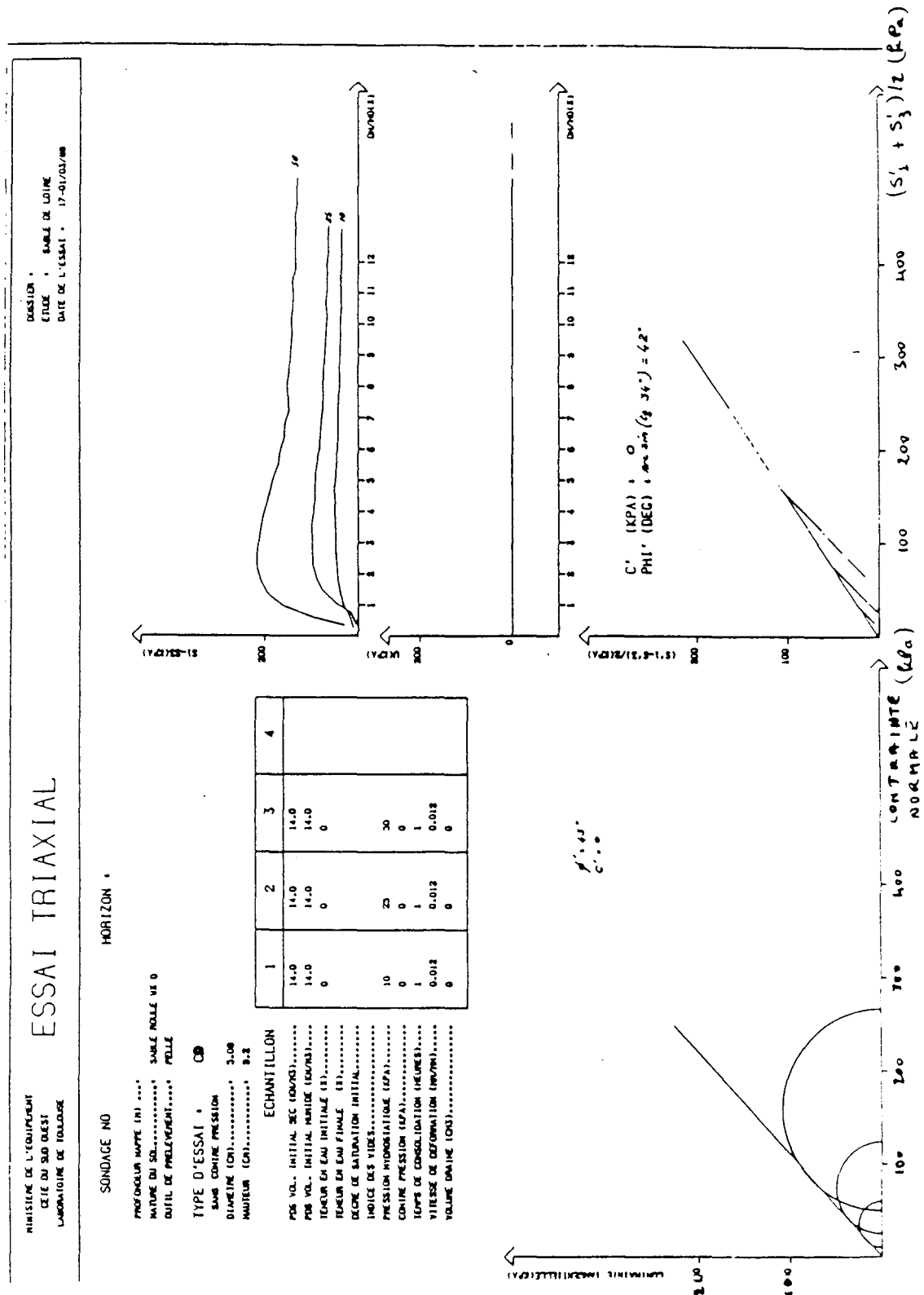
$$\rho = 1,5 \text{ t/m}^3$$

$$\varphi_e = 40^\circ$$

a) $m = 1$ b) $m = 0 ; l = 0.5 \text{ m}$ c) $m = 1$ d) $m = 1$ 

ANNEXE C

C.1 - QUELQUES RESULTATS DES ESSAIS TRIAXIAUX



MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT
DE LA ROUTE
LABORATOIRE DE TOLDOUSE

ESSAI TRIAXIAL

DOSSIER :
ÉTUDE :
DATE DE L'ESSAI : 4-8/1/88

SONDAGE NO

HORIZON :

PROFONDEUR MOYENNE (m) :
NATURE DU SOL :
OUTIL DE PRÉLÈVEMENT :
PELLE

TYPE D'ESSAI :
SANS CONTRainte
DIAMÈTRE (cm) :
HAUTEUR (cm) :

ECHANTILLON

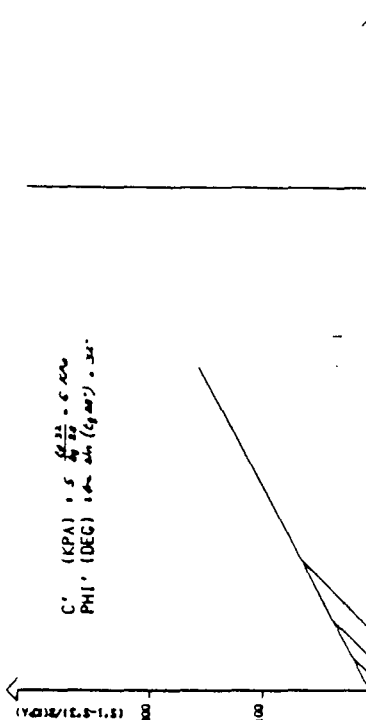
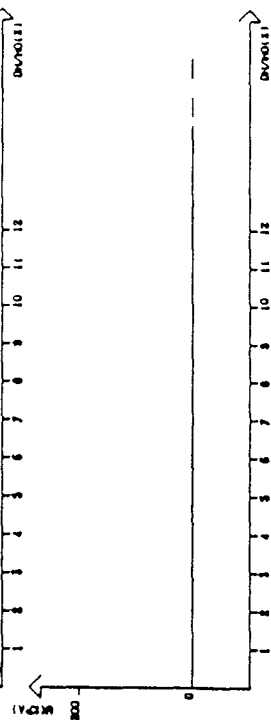
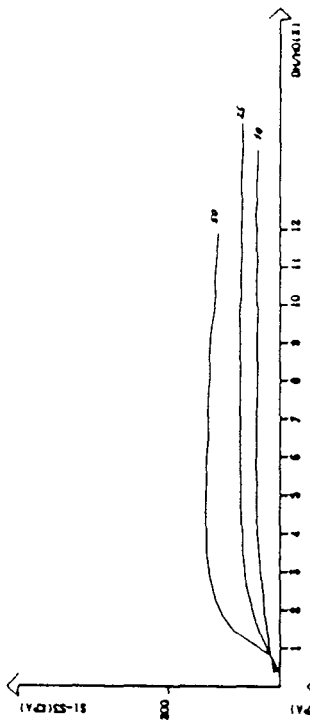
POS VOL. INITIAL SEC (TONNES) :
POS VOL. INITIAL HUMIDE (TONNES) :
Teneur en Eau INITIALE (%) :
Teneur en Eau FINALE (%) :
DEGRE DE SATURATION INITIAL :
INDICE DES VIDES :
PRESSION HYDROSTATIQUE (KPA) :
CONTRainte (KPA) :
TEMPS DE CONSOLIDATION (HEURES) :
VITESSE DE DÉFORMATION (MM/MIN) :
VOLUME UNITAIRE (CM³) :

1	2	3	4
14.0	14.0	14.0	
14.4	14.4	14.4	
3	3	3	
10	25	50	
0	0	0	
1	1	1	
0.012	0.018	0.018	
0	0	0	

(KPa)

Contrainte

$\sigma'_v = 27.5$
 $C' = 2.5 \text{ kPa}$



$C' \text{ (KPa)} = 5 \left(\frac{27.5}{14.4} - 1 \right) = 2.5$
 $\phi' \text{ (DEG)} = \tan^{-1} \left(\frac{27.5}{14.4} - 1 \right) = 34.7$

$(\sigma'_1 + \sigma'_3) / 2 \text{ (KPa)}$

Contrainte
normale
(KPa)

MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT
CITE DU SUD OUEST
LABORATOIRE DE TOLDOSE

ESSAI TRIAXIAL

DOSSIER :

ETUDE :

DATE DE L'ESSAI : 7-11/1/88

SONDAGE NO

HORIZON :

PROFONDEUR MAPPE (M)

NATURE DU SOL..... SABLE DE LOIRE MOLE

OUTIL DE PRELEVEMENT..... PELLE

TYPE D'ESSAI : CD

SANS CONTRainte PRESSION

DIAMÈTRE (CM)..... 3.00

HAUTEUR (CM)..... 10.16

ECHANTILLON

POS VOL. INITIAL SEC (CM³).....

POS VOL. INITIAL HUMIDE (CM³).....

TEMPERATURE EN EAU INITIALE (°C).....

TEMPERATURE EN EAU FINALE (°C).....

DEGRE DE SATURATION INITIAL.....

INDICE DES VIDES.....

PRESSION HYDROSTATIQUE (KPA).....

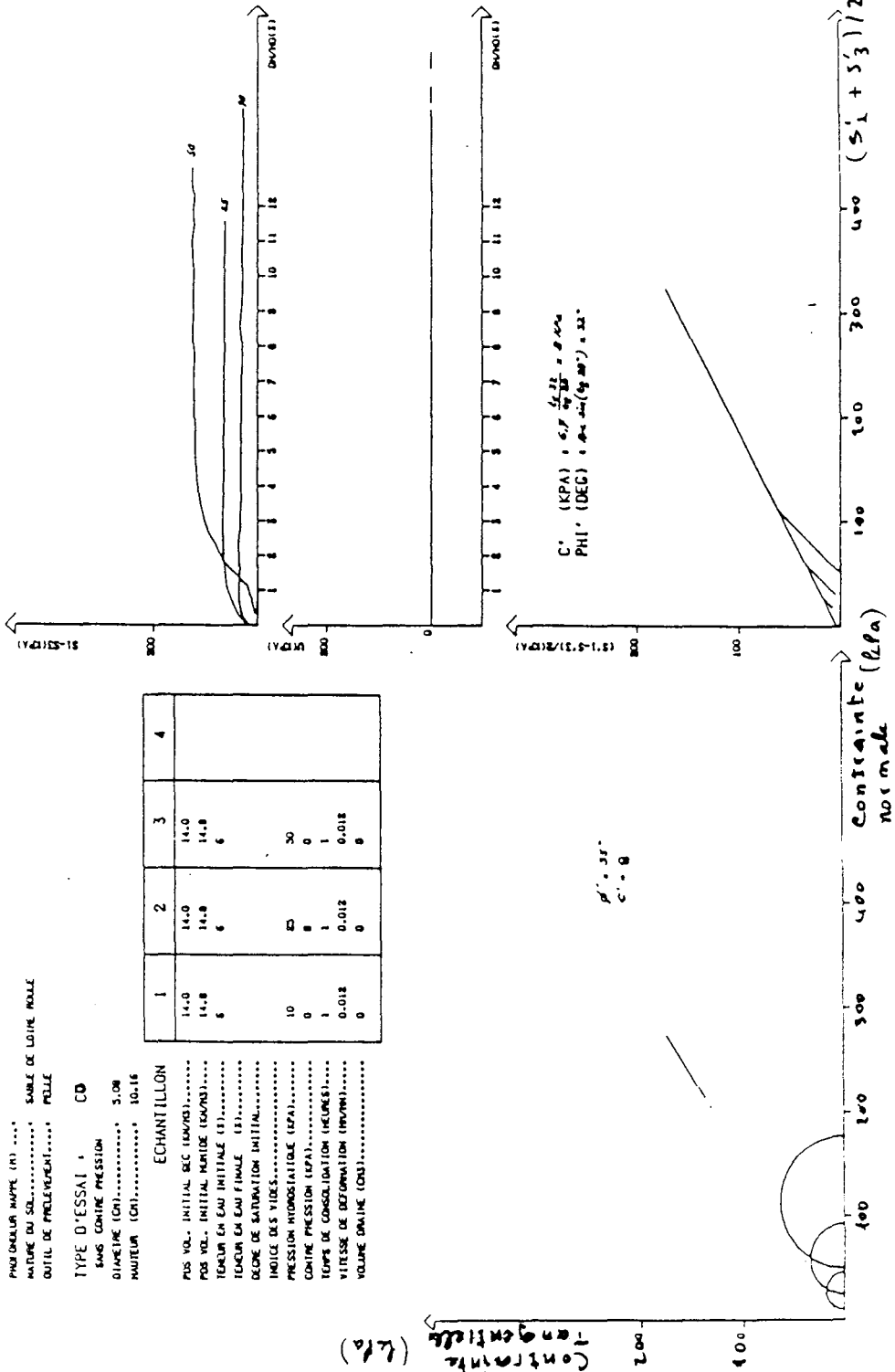
CONTRainte PRESSION (KPA).....

TEMPS DE CONSOLIDATION (HEURES).....

VITESSE DE DEFORMATION (MM/MM).....

VOLUME DRAINE (CM³).....

1	2	3	4
14.0	14.0	14.0	
14.8	14.8	14.8	
5	5	5	
10	25	50	
0	0	0	
1	1	1	
0.012	0.012	0.012	
0	0	0	



ESSAI TRIAXIAL

MINISTRE DE L'ÉQUIPEMENT
CITÉ DU SAO QUÉBEC
LABORATOIRE DE TOULOUSE

DOSSIER :
ÉTUDE : SABLE DE LOIRE
DATE DE L'ESSAI : 14-23/02/88

SONDAGE NO

HORIZON :

PROFONDEUR MOYENNE (m) :
NATURE DU SOL : SABLE MOYEN VÉL
OUILE DE PRELEVEMENT : PELLE

TYPE D'ESSAI : CD

SANS CONTRAINTE PRESSION

DIAMÈTRE (cm) : 3.08

HAUTEUR (cm) : 9.1

ECHANTILLON

POS VOL. INITIAL SEC (g/cm³) : 14.0

POS VOL. INITIAL MOYEN (g/cm³) : 14.0

TENEUR EN EAU INITIALE (%) : 0

TENEUR EN EAU FINALE (%) : 0

DEGRÉ DE SATURATION INITIALE : 0

INDICE DES VIDES : 0

PRESSIION HYDROSTATIQUE (kPa) : 10

CONFINEMENT (kPa) : 0

TEMPS DE CONSOLIDATION (HEURES) : 1

VITESSE DE DÉFORMATION (mm/min) : 0.012

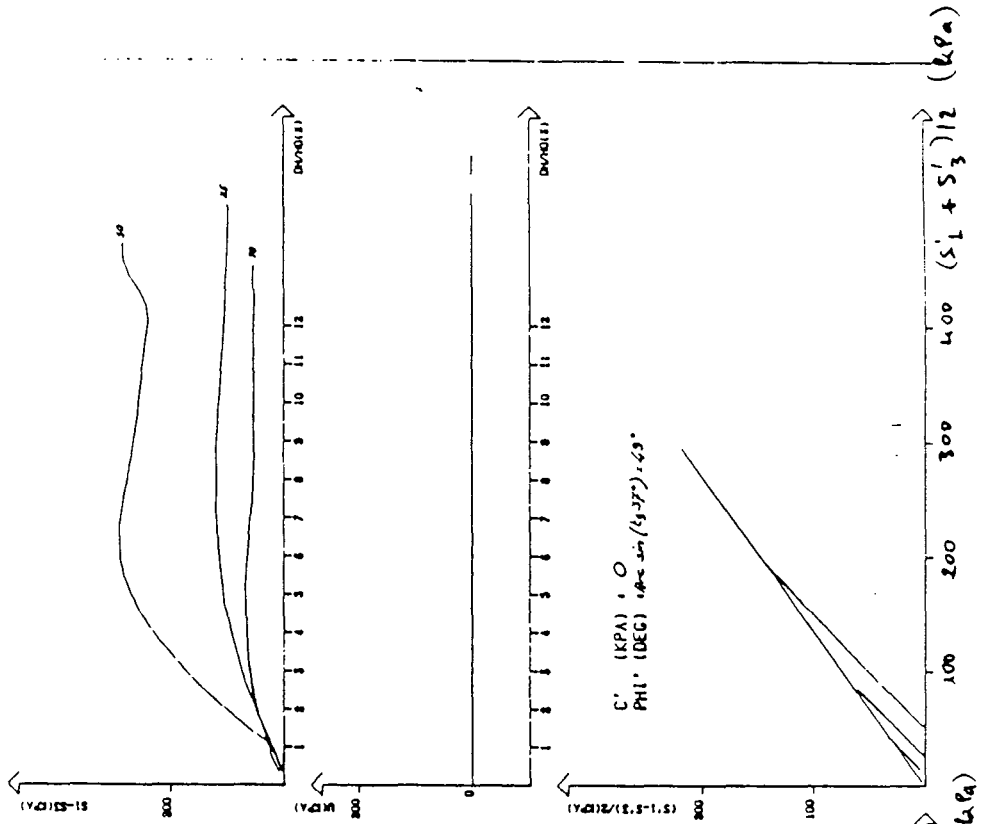
VOLUME D'EAU (cm³) : 0

1	2	3	4
14.0	14.0	14.0	
14.0	14.0	14.0	
0	0	0	
10	25	30	
0	0	0	
1	1	1	
0.012	0	0.012	
0	0	0	

Contrainte
tangentielle (kPa)

$\phi' = 40^\circ$
 $c' = 0$

Contrainte
normale (kPa)



ESSAI TRIAXIAL

RUESSICA ,
 ETUDE , SABLE DE LOIRE
 DATE DE L'ESSAI , 21-23/12/07

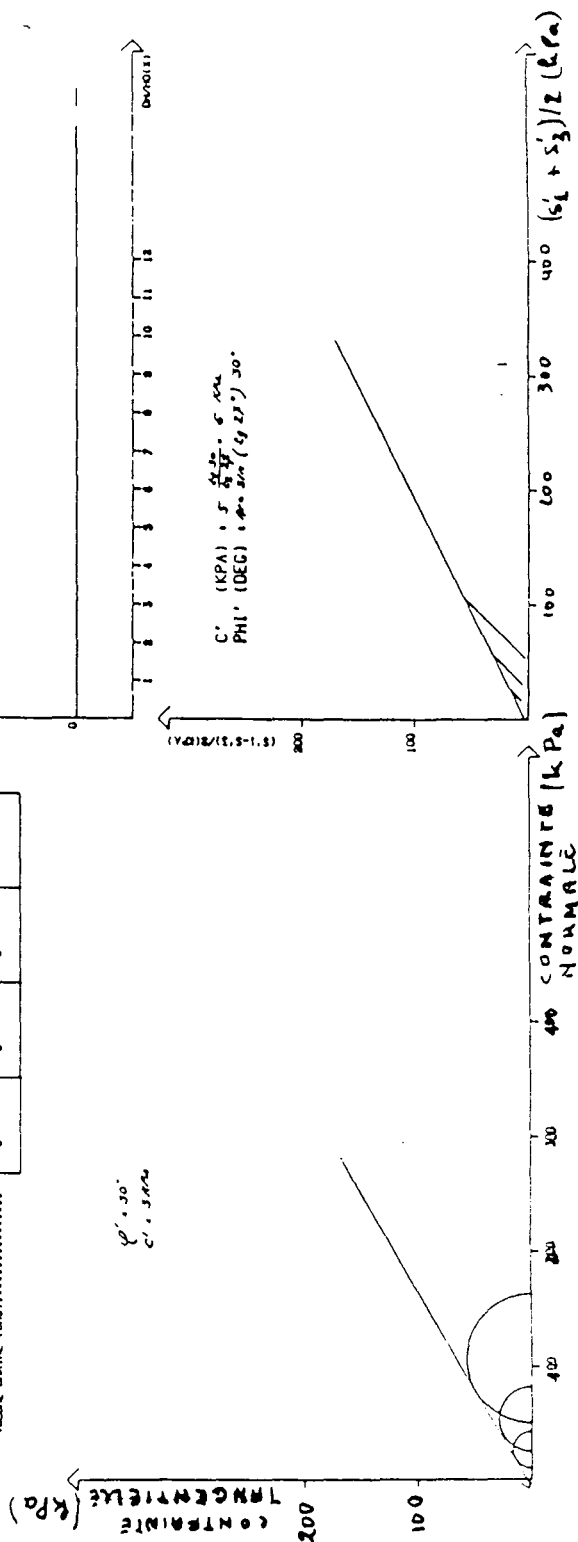
SONDAGE NO

NOZ1HOM4

PROFONDEUR NAPPES (M) ...
NATURE DU SOL.....
SABLE BRUYE VS 4
PELLE
OUIIL DE PROLEVEMENT.....

TYPE OF SEAL :	CD
SAND CONTAIN PRESSION	
DIAPHRAGM (CM).....	3.08
HAUTEUR (CM).....	10.16

ECHANTILLON	1	2	3	4
POS VOL. INITIAL SEC (TEMP/3).....	14.0	14.0	14.0	
POS VOL. INITIAL MARQUE (TEMP/3).....	14.5	14.5	14.5	
TEMPO EN EAU INITIALE (21).....	4	4	4	
TEMPO EN EAU FINALE (21).....				
DEGRE DE SATURATION INITIAL.....				
CHOIX DES VITES.....				
PRESSION HYDROSTATIQUE (EPA).....	10	25	30	
PRESSION (EPA).....	0	0	0	
PRESSION (EPA).....	0	0	0	
TEMPS DE CONSOLIDATION (HEURES).....	1	1	1	
TEMPS DE DEFOMATION (HEURES).....	0.012	0.012	0.012	
VOLUME D'EAU (OUI).....	0	0	0	



MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT
CITÉ DU QUÉBEC
LABORATOIRE DE TROUPE

ESSAI TRIAXIAL

DOSSIER :
ÉTUDE :
DATE DE L'ESSAI : 18/12/87

SONDAGE NO

HORIZON :

PROFONDEUR NAPPES (m) :
NATURE DU SOL :
OUTIL DE PRÉLÈVEMENT :
POMPE :

TYPE D'ESSAI : CD

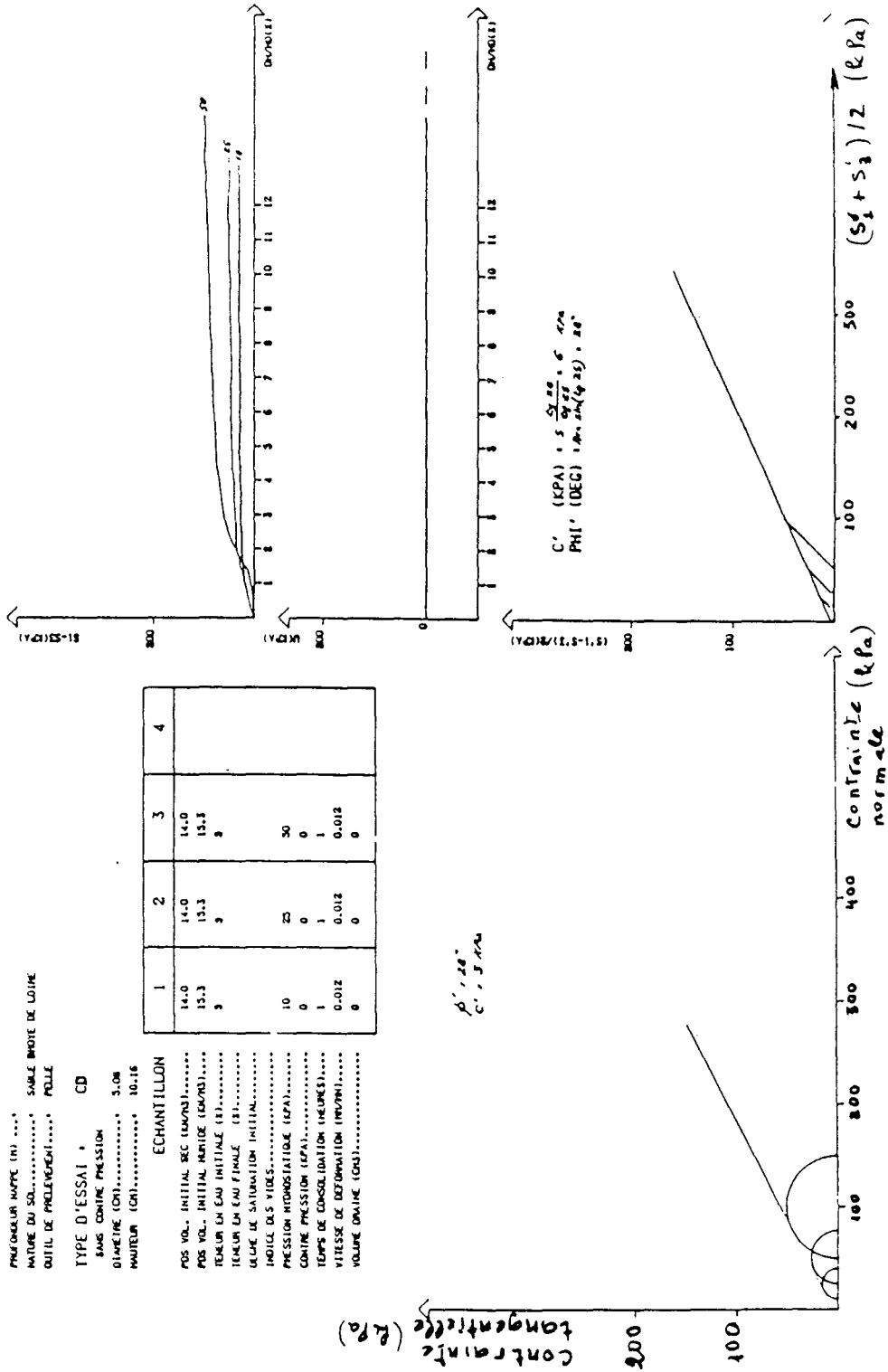
SANS CONTRainte PRESSION
DIAMÈTRE (cm) : 3.08
HAUTEUR (cm) : 10.16

ECHANTILLON

POS VOL. INITIAL REC (cm³) :
POS VOL. INITIAL NAPPES (cm³) :
TENSUR EN EAU INITIALE (kPa) :
TENSUR EN EAU FINALE (kPa) :
VOLUME DE SATURATION INITIALE :
INDICE DES VIDES :
PRESSION HYDROSTATIQUE (kPa) :
CONTRainte PRESSION (kPa) :
TEMPS DE CONSOLIDATION (HEURES) :
VITESSE DE DÉFORMATION (mm/min) :
VOLUME DRAINE (cm³) :

1	2	3	4
14.0	14.0	14.0	
12.3	12.3	12.3	
3	3	3	
10	25	50	
0	0	0	
1	1	1	
0.012	0.012	0.012	
0	0	0	

$\phi' = 20^\circ$
 $c' = 5 \text{ kPa}$



C.2 - TECHNIQUE DE L'ANALYSE FACTORIELLE EN COMPOSANTE PRINCIPALE

C.2.1 - GENERALITE SUR L'ANALYSE DES DONNEES

L'analyse des données, appelée aussi méthodes statistiques multidimensionnelles, permet d'étudier des phénomènes dont les variations, l'évolution et le comportement dépendent de plusieurs paramètres. Les données désignent des résultats d'observations effectuées sur des entités appelées "individus" (ou échantillons ou objets). Les relevés faits sur les individus s'appellent variables (ou paramètres ou caractères). Les variables quantitatives mesurent une quantité. Les variables qualitatives mesurent un état. Un codage permet de rendre numérique les données qualitatives. Les données quantitatives peuvent être continues (type mesure) ou discontinues (type fréquence). Les données illustratives contribuent à la description mais pas aux "calculs". Les données se présentent sous forme d'un tableau ou d'une matrice (n, p) , ayant en ligne n individus et en colonnes p variables. Il existe plusieurs types de tableaux : de mesure, de contingence (données type fréquence), logique (données codées par 1 et 0), de préférence, de rangs, mixte (données quantitatives et qualitatives). La pertinence (problème bien défini, a un sens), l'exhaustivité (représentativité) et l'homogénéité qualifient un tableau. Ainsi lorsqu'un tableau de mesure contient des variables d'unités différentes il faut effectuer une opération de centrage réduction afin de rendre les données homogènes. De même, pour un tableau mixte il faut coder les données quantitatives.

En faisant une représentation géométrique des données on introduit un problème d'espace vectoriel. Les lignes du tableau (ou de la matrice) forment un nuage de n points pesants dans l'espace à p dimensions engendré par les p colonnes. Les colonnes du tableau forment un nuage de p points pesants dans l'espace à n dimensions engendré par les n points lignes. Pour une seule variable il s'agit d'un histogramme et pour deux variables il s'agit d'un diagramme plan. L'analyse des données permet d'extraire les informations contenues dans ces deux nuages (d'individus et de variables) et de mettre ceux-ci en relation.

En effet le comportement des individus dépend des variables liées à ce comportement et les relations entre variables dépendent des individus qui engendrent ces relations. En fonction de l'objectif à atteindre il existe des méthodes spécifiques pour l'analyse. Pour la caractérisation des matériaux nous avons choisi l'analyse factorielle en composantes principales. En effet il faut d'abord voir et décrire les corrélations entre les matériaux, entre les paramètres et entre matériaux et paramètres avant d'adopter une méthode explicative ou décisionnelle.

C.2.2. - L'ANALYSE FACTORIELLE EN COMPOSANTE PRINCIPALE

Les nuages des points individus et des points variables contiennent des informations qu'il faut extraire. L'analyse factorielle a pour but de trouver des axes de projection du nuage qui font perdre le moins d'information possible. Ces axes s'appellent "facteurs" ou "axes factorielles". Ensuite on fait des projections du nuage sur des plans engendrés chacun par deux facteurs. La projection doit donner une image aussi fidèle que possible de la réalité de proximités dans l'espace. pour définir la proximité ou la distance dans l'espace considéré il faut choisir une métrique. Maintenant,

les termes "points pesants" (signalés plus haut) et "distance" introduisent la considération de l'inertie globale du nuage ainsi que de la perte d'inertie lors de la projection sur les axes factoriels. Parmi ces derniers il existe un qui donne la meilleure projection donc qui déforme le moins possible le nuage initial.

C'est le premier axe factoriel noté F_1 . F_1 apporte la plus grande partie possible de l'inertie du nuage.

Il existe un second axe factoriel F_2 orthogonal à F_1 qui extrait la plus grande partie résiduelle de l'inertie entre F_1 et le nuage.

L'axe factoriel F_3 rend compte de la plus grande dispersion résiduelle de l'inertie entre F_1 et F_2 tout en étant orthogonal à F_2 .

La démarche reste identique pour définir les autres axes factoriels jusqu'à l'obtention de 100 % de l'inertie globale du nuage. L'algorithme mathématique pour chercher les axes factoriels consiste à diagonaliser la matrice de covariance (données centrées) ou la matrice de corrélation (données centrées réduites) entre individus ou entre variables selon le nuage à considérer. Comme il s'agit de matrice symétrique et semi-définie positive les valeurs propres sont réelles positives ou nulles (donc rangeables dans l'ordre) et les vecteurs propres sont orthogonaux. Ces vecteurs propres correspondent aux axes factoriels. La valeur propre représente pour chaque facteur le montant de l'inertie du nuage sur ce facteur. Cette inertie sur l'axe factoriel résulte soit des contributions des individus projetés soit de celles des variables projetées. La somme de toutes les contributions (des individus ou des variables constitue la part d'inertie apportée par le facteur. Une représentation des individus et des variables) sur le même graphique est possible en analyse factorielle en composante principale. En effet un individu se situe au barycentre de toutes les variables dans le nuage de celles-ci. De même une variable se situe au barycentre de tous les individus dans le nuage de ceux-ci. Par contre la comparaison doit se faire dans un même ensemble (entre individus ou entre variables mais pas entre un individu et une variable), ensuite l'interprétation peut s'étendre par exemple en tirant une conclusion sur la position d'une paire d'individus vis-à-vis d'un sous-groupe de variables pour lesquelles ils ont des comportements voisins et celles pour lesquelles ils s'opposent.

Enfin, deux points très rapprochés sur le plan de projection ne sont pas forcément bien corrélés. Tout dépend de la qualité de cette projection. En effet deux points très éloignés sur le nuage initial peuvent avoir des projetés très voisins. La qualité de représentation d'un point A dépend de l'angle entre OA (O étant l'origine) et l'axe de projection. Du moins on la qualifie par le cosinus (corrélations variables - facteur) ou le cosinus carré (individus facteur) de cet angle. Plus le cosinus carré tend vers 1 mieux la projection respecte la distance. La somme des cosinus carrés évalués sur deux axes indique la qualité de la représentation du point sur le plan formé par ces deux axes.

ANNEXE D

D.1 - TECHNIQUE DE LA DETECTION DU RAYONNEMENT GAMMA

La technique des mesures effectuées pendant les expérimentations sur modèles réels repose sur la détection du rayonnement γ qui provient soit du matériau à cause de la présence du traceur radioactif, soit d'une source de césium 137 pour la détermination de l'épaisseur ou la densité du matériau traversé par les photons γ . Il semble donc utile de rappeler brièvement la notion d'activité d'une substance radioactive, le phénomène d'interaction du rayonnement γ dans la matière et le principe de la détection de ce rayonnement.

D.1.1 - ACTIVITE D'UNE SUBSTANCE RADIOACTIVE

Le rayonnement électromagnétique γ provient d'une émission radioactive au cours de laquelle le noyau d'un élément radioactif passe d'un état excité à un état stable ou un état d'énergie plus faible. L'activité d'une substance $C(t)$ représente le nombre moyen de ses atomes qui se désintègrent par unité de temps. La loi de la désintégration radioactive permet de déterminer $C(t)$:

$$C = C_0 \exp (-\lambda t) \quad (d.1)$$

Dans cette expression C_0 représente le nombre d'atome présent à l'instant initial t_0 et λ la constante de désintégration.

On définit la période ou demi-vie le temps T au bout de laquelle se désintègre la moitié de la substance :

$$T = \text{Log}2/\lambda$$

L'activité se mesure en curie (Ci) ou en un de ses sous-multiples millicurie (mCi) et microcurie (μ Ci).

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ désintégrations/seconde} = 10^3 \text{ mCi} = 10^6 \mu \text{Ci}.$$

L'énergie mise en jeu lors de la désintégration s'évalue en électron-volt (ev) ou en un de ses multiples kiloélectron-volt (Kev) et mégaélectron-volt (Mev).

$$1 \text{ Mev} = 10^3 \text{ Kev} = 10^6 \text{ ev}$$

D.1.2. - INTERACTION DU RAYONNEMENT GAMMA AVEC LA MATIERE

D.1.2.1 - PRINCIPALES INTERACTIONS

Il existe deux modes d'interaction : photon-noyau et photon-électron. Pour nos essais on ne se préoccupe que de ce dernier qui peut se produire de trois manières :

- Effet photoélectrique : après le choc le photon disparaît et transmet totalement son énergie E_{γ_p} à l'électron pour le libérer de l'atome.
- Effet Compton : c'est une diffusion de photon γ sur les électrons peu liés. Le photon incident communique à l'électron une partie E_{γ_e} de son énergie.
- Effet de matérialisation : il y a transformation totale de l'énergie (E_{γ_m}) (donc du photon) en masse.

Comme cette troisième interaction nécessite une énergie supérieure à 1 MeV [72, 73] elle a peu de chance de se produire dans le cadre de nos essais. Les différents détecteurs sont réglés de façon à capter les électrons issus de l'effet photoélectrique.

D.1.2.2 - DETERMINATION DE L'ÉPAISSEUR ÉQUIVALENTE DE MATÉRIAU

Considérons la propagation de rayonnement γ à travers un matériau d'épaisseur x . Soient N_0 et N respectivement le nombre de photons présents avant la traversée et le nombre de photons n'ayant pas subi d'interaction après la traversée. On montre que l'atténuation du faisceau γ dans le matériau suit la formule :

$$N = N_0 \exp(-\mu' \rho x) \quad (d.2)$$

ρ est la masse volumique du matériau

μ' s'appelle coefficient d'absorption massique.

Expérimentalement les photons déviés sous un angle très faible sont pris en compte et constituent donc des parasites. Ainsi dans la pratique on détermine une valeur expérimentale $k\mu'$ du coefficient d'absorption massique ; k dépend du matériel et de son installation.

Le détecteur mesure l'épaisseur équivalente ρx dont l'expression se déduit de (d.2).

$$\rho x = (\text{Log } N_0 - \text{Log } N) / k\mu' \quad (d.3)$$

Sur le banc d'essai de Blois (fig. 4.1) :

$$k\mu' = 0.06903 \text{ cm}^2/\text{g} \text{ pour le détecteur 2}$$

$$k\mu' = 0.07294 \text{ cm}^2/\text{g} \text{ pour le détecteur 3}$$

D.1.2.3 - INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE MATÉRIAU SUR LE COMPTAGE INDIUM

A cause du phénomène d'interaction du rayonnement γ dans la matière, le comptage obtenu avec un matériau marqué doit être corrigé en fonction de l'épaisseur de celui-ci. En admettant que le traceur se répartit de manière homogène dans le matériau, on montre la loi de variation du comptage en fonction de l'épaisseur.

$$C = C_0 [1 - \exp(-ku'x)] \quad (d.4)$$

C_0 est le comptage obtenu avec une couche d'épaisseur infinie.

$ku' = 0,074 \text{ cm}^2/\text{g}$ pour le détecteur 1 (fig.4.1)

D.1.3 - PRINCIPE DE LA DETECTION DU RAYONNEMENT GAMMA

D.1.3.1 - SYSTEME DE DETECTION

Il comprend un scintillateur (cristal de substance fluorescente), un photomultiplicateur et un circuit adaptateur d'impédance (fig. d.1)

Le photon pénétrant dans le scintillateur engendre selon le processus d'interaction un photoélectron ou des électrons Compton. Le cristal excité émet par scintillation des photons lumineux qui, en frappant la photocathode provoquent l'émission de photoélectrons. Ceux-ci accélérés, puis multipliés après chaque choc aux dynodes seront collectés par l'anode qui transforme la charge reçue en impulsions électriques. Celles-ci sont amplifiées avant d'être transmises à la chaîne de mesure.

D.1.3.2 - CHAINE DE MESURE

L'électronique associée au détecteur à scintillation comprend :

- Un circuit amplificateur pour que les impulsions puissent déclencher la chaîne de mesure.
- Un discriminateur ou un sélecteur d'amplitude : seules les impulsions qui correspondent à l'énergie photoélectriques sont gardées.
- Une échelle de comptage ou intégrateur associable à un enregistreur graphique
- Un module d'acquisition du comptage (micro-ordinateur).

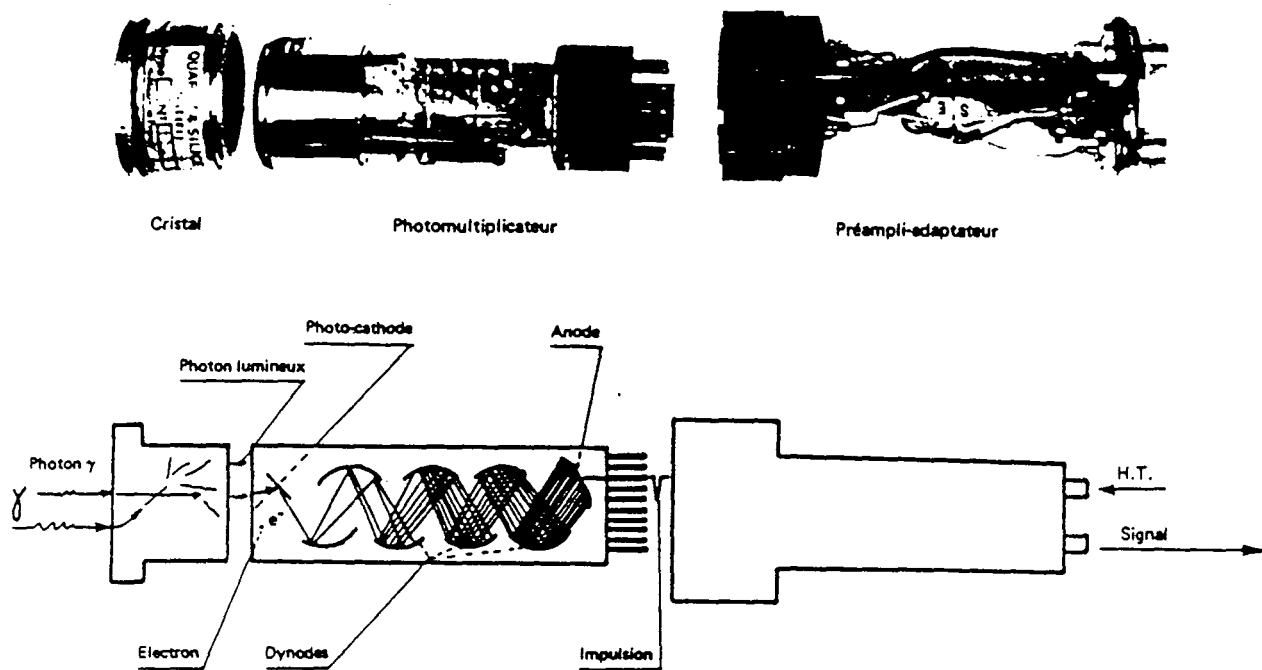


fig. d.1 Schéma d'un détecteur à scintillation

D.1.3.3 - INCERTITUDE SUR LE COMPTAGE

Il a été montré que le nombre d'impulsion N enregistré par un capteur de photon γ , pendant une durée donnée, est distribué selon une loi de Poisson qui, dès que $N > 50$ peut être assimilée à une loi normale de moyenne estimée N et d'écart-type $\sigma = \sqrt{N}$. L'erreur absolue sur le comptage a comme valeur $\pm t_{\alpha} \sigma$, t_{α} est choisi afin que $N \pm t_{\alpha} \sigma$ encadre la vraie valeur de la moyenne avec une probabilité $P = 1 - 2\alpha$.

d.2 - PLANS D'EXPERIENCE

Tableau d.1 - Essais réalisés avec la trémie à extraction

MATERIAUX	w %	MARQUAGE								
		Niveau 3			NIVEAU 2			NIVEAU 1		
		AVant	ARrière	TRans	AV	AR	TR	AV	AR	TR
Sable roulé de Loire 0/4	mini	5	4	16	2	3	15	6	7	17
	maxi	8	9	71	11	10	54	12	13	70
Sable broyé de Loire 0/2	mini	43	42	52	40	41	51	39	38	50
	maxi	44	45	24	47	46	19	48	49	18
Sable calcaire Amiot 0/2	mini	27	26	20	28	29	21	31	30	22
	maxi	36	35	23	33	34	25	32	37	53
Cendres volantes	mini	57 59	58	//	60	63	55	66	67	//
	maxi	65	64	//	62	61	56	69	68	//

N.B - Les noms des essais effectués avec cette trémie se composent du numéro de l'essai qui figure dans le tableau précédé de "E6 -" ex : E6-1 pour l'essai n° 1.

Tableau d.2 - Essais réalisés avec la trémie à écoulement

MATERIAUX	Vibreux	w % Essai	MARQUAGES								
			Long. AVant			Long. ARrière			TRansv. droite		
			Niv1	Niv2	Niv3	Niv1	Niv2	Niv3	Niv1	Niv2	Niv3
Sable roulé de Loire 0/4		min	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
		n°	8	4	7	9	5	6	10	11	12
		max	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	6	5.6	5.6
		n°	59	62	63	60	61	64	69	66	65
Sable broyé de Loire 0/2	X	min	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	4.1	4.1	4.1
		n°	30	29	26	32	28	27	15	14	13
	X	max	9.4	8.7	8.7	9.4	9.4	8.4	9.3	9.9	9.9
		n°	44	34	33	43	42	31	16	67	68
Sable broyé Calcaire Amiot 0/2		min	4.8	5.6	5.6	4.8	4.8	5.6	4.9	4.9	5.2
		n°	25	22	21	24	23	20	19	18	17
	X	max	12.4	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	8.2	8.2	9.7
		n°	35	38	39	36	37	40	45	46	47
Cendres volantes de Vitry		min									
		n°									
	X	max	25	25	25	25	25	25	25	25	25
		n°	55	54	51	56	53	52	48	49	50
Sable broyé calcaire 0/6		min									
		n°									
		max	6.9			6.9					
		n°	58			57					

N.B - Avec cette trémie le nom de l'essai se compose de son numéro figurant dans le tableau précédé de "E.7 -"

Tableau d.3 - Essais réalisés avec la trémie à écoulement équipée d'un dispositif anti-voûte.

MATERIAUX	Vibreux	w %	Marquages Transv à droite		
		Essai	Niveau 1c	Niveau 2c	Niveau 3c
Sable broyé de Loire 0/2	X	min	4.3	4.3	4.3
		n°	71	72	73
	X	max	10	10	10
		n°	74	75	76
Sable roulé de Loire 0/4		max		5	
		n°		70	

N.B - Avec cette trémie le nom de l'essai se compose de son numéro figurant dans le tableau précédé de "E.7 -".

ANNEXE E

E.1 - LA CENTRIFUGEUSE

E.1.1 - JUSTIFICATION ET PRINCIPE DES ESSAIS EN CENTRIFUGEUSE

Pour réaliser des essais avec un modèle réduit il faut respecter des conditions de similitude afin d'observer les mêmes phénomènes que sur son modèle réel. Ces conditions s'expriment sous forme de rapport ou échelle X^* à satisfaire entre une grandeur physique de la maquette (X_m) et la grandeur homologue du prototype (X_p), et ce pour toutes les grandeurs qui interviennent :

$$X^* = \frac{X_m}{X_p} \quad (e.1)$$

Pour les études en centrifugeuse les rapports de similitude doivent respecter les équations indéfinies de l'équilibre de la dynamique des milieux continus :

$$\sum_j \frac{\partial (\sigma_{ij})_p}{\partial (x_j)_p} + \rho_p \left[(g_i)_p - \frac{\partial^2 (\xi_i)_p}{\partial t_p^2} \right] = 0 \quad (e.2)$$

$(x_j)_p = (x_j)_m / l^*$ désignent les coordonnées spatiales,

$(\sigma_{ij})_p = (\sigma_{ij})_m / \sigma^*$ les composantes du tenseur des contraintes

$(\xi_{ij})_p = (\xi_{ij})_m / \xi^*$ celles du déplacement,

$(g_i)_p = (g_i)_m / g^*$ celles des forces de masse,

$\rho_p = \rho_m / \rho^*$ la masse volumique

et $t_p = t_m / t^*$ le temps

Les équations (e.2) peuvent ainsi s'écrire :

$$\sigma^* l^{-1} \sum_j \frac{\partial (\sigma_{ij})_m}{\partial (x_j)_m} + \rho^* \rho_m \left[g^* (g_i)_m - \xi^* t^{*-2} \frac{\partial^2 (\xi_i)_m}{\partial t_m^2} \right] = 0 \quad (e.3)$$

Les équations (e.2) demeurent formellement vérifiées si les échelles satisfont aux conditions suivantes (établies à partir de (e.3)) :

$$\sigma^* = \rho^* g^* l^* \quad (e.4)$$

$$\xi^* = g^* t^{*2} \quad (e.5)$$

Dans notre étude on considère que l'état de contrainte gouverne l'écoulement du matériau. C'est un processus de déformation plastique dans laquelle le cisaillement joue un rôle prépondérant. Il semble donc important de recréer le même état de contrainte dans le matériau ($\sigma^* = 1$). Pour avoir un champ de déformation identique il faut que les matériaux du prototype et de la maquette aient le même comportement. Il est préférable de trouver un matériau de substitution. La condition (e.4) devient alors :

$$g^* = 1 / l^* \quad (e.6)$$

L'équation (e.6) signifie qu'il faut accroître les forces de masse appliquées au modèle réduit. La CENTRIFUGEUSE permet de réaliser cette dernière condition.

En outre, on prend la même échelle l^* pour les longueurs et les déplacements ($l^* = \xi^*$). La condition (e.5) donne alors :

$$t^* = l^*$$

Les principaux facteurs de similitudes qui s'appliquent à la modélisation en centrifugeuse figurent dans le tableau e.1.

Tableau e.1 - Principaux facteurs d'échelle pour la modélisation en centrifugeuse

GRANDEUR	Facteur d'échelles	GRANDEUR	Facteur d'échelles
Accélération	N	Masse volumique	1
Longueur	1/N	Vitesse	1
Déplacement	1/N	Contrainte	1
Déformation	1	Temps	1/N

E.1.2 - CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE LA CENTRIFUGEUSE

DIMENSIONS

Distance axe à plate-forme nacelle	5,50 m
Longueur du rotor	6,80 m
Diamètre salle de centrifugation	13,50 m
Hauteur salle de centrifugation	3,90 m
Nacelle pivotante	
• longueur plate-forme	1,40 m
• largeur plate-forme	1,15 m
• hauteur libre	1,50 m

DIMENSIONS

Distance axis to basket platform	
Length of the rotor	
Centrifuge chamber diameter	
Centrifuge chamber height	
Swinging basket	
• platform length	
• platform width	
• available height	

PERFORMANCES

Masse du modèle (max)	2 000 kg
Accélération maximale (à 5 m)	200 g
Balourd admissible	± 100 kN
Temps de montée à 200 g	360 s

PERFORMANCE

Model mass (max)	
Max. acceleration (at 5 m)	
Allowable unbalance	
Run up time to 200 g	

MOTORISATION

Moteur asynchrone bi-vitesses	
1 000 et 1 500 t/min	
Puissance nominale	410 kW
Régulation de vitesse par coupleur	
et frein électromagnétiques	
Rapport de réduction	7

DRIVE SYSTEM

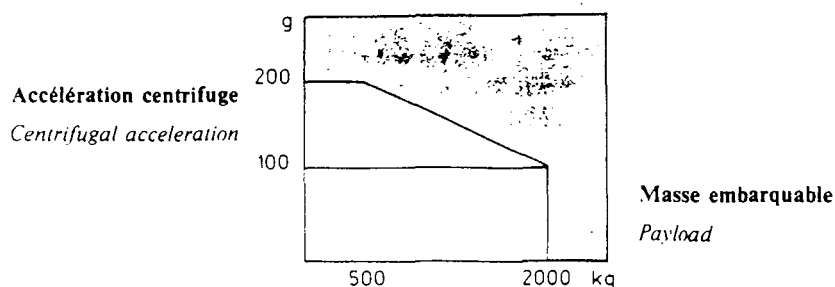
Dual-speed AC motor	
1000 and 1500 rpm	
Nominal power	
Speed régulation by eddy current	
clutch and brake	
Speed reduction ratio	

LIAISONS AVEC LE MODELE

Contacts tournants bas niveau	101
Contacts tournants puissance	5
Joints hydrauliques	6
Pression (max) dans joints fluides	20 MPa

CONNEXIONS TO THE MODEL

Low-level slip-rings	
High-level slip-rings	
Hydraulic slip-rings	
Max pressure on hydraulic slip-rings	



Domaine d'utilisation de la centrifugeuse du L.C.P.C.

Range of application of the L.C.P.C. Centrifuge

E.2 - EXPERIMENTATIONS EN CENTRIFUGEUSE

E.2.1 - Plan d'expérience (voir tableaux e.2 à e.6)

Tableau e.2 - ESSAIS EFFECTUES AVEC LE SABLE ROULE DE LOIRE

			ANGLE D'INCLINAISON DE LA PAROI θ_p (°)											
			20				30				40			
			Nom Essai	A (cm)	w (%)	Observation	Nom Essai	A (cm)	w (%)	Observation	Nom Essai	A (cm)	w (%)	Observation
D i m e n s i o n à l a b a s e D e n c m	1	é c r o u l l e m e n t à t								DOD 14	5	3.5	Limite de la voûte	
	2						DOD 10 et DOD 11	5	2.3	Pour répétitivité	DOD 8	5	2.3	
	4						DOD 9	7	2.3		DOD 7	5	2.3	
	5	e x t r é m a c i e t à n					DOD 6	6	2.3					
	10		DOD 16	5.3	3		DOD 12	5	2.3		DOD 15	5	3.5	
							DOD 54 à DOD 58	5	2.8	Pour répétitivité				
15	DOD 17 et DOD 18	5.3	2.8	Pour répétitivité	DOD 13	5	3.5							

Tableau e.3 - ESSAIS EFFECTUES AVEC LE SABLE BROYE DE LOIRE 0/2 - w FAIBLE

			ANGLE D'INCLINAISON DE LA PAROI θ_p (°)											
			20				30				40			
			Nom Essai	A (cm)	w (%)	Observation	Nom Essai	A (cm)	w (%)	Observation	Nom Essai	A (cm)	w (%)	Observation
D i m e n s i o n à l a b a s e D e n c m	1	é t r o u é m e n t								DOD 24	5	4.2	Voûte à 5 g	
	2						DOD 28 et DOD 29	5	4.4	Répétitivité Voûte à 5 g Rupture à 6 g	DOD 23	5	4.2	Limite de la voûte
	4						DOD 33	7	4.2		DOD 25	5	4.4	
	8										DOD 26	11.5	4.2	
	6	e x t r é r m a i c e t i o n					DOD 32	5	4.2					
	10		DOD 22	5	4.2		DOD 34 et DOD 35	5	4.4	Pour répétitivité				
							DOD 36	3	4.4	Pour voir l' influence de A				
	15			DOD 19 et DOD 21	5	4.4	Pour répétitivi- té					DOD 27	5	4.2

Tableau e.4 - ESSAIS EFFECTUES AVEC LE SABLE BROYE DE LOIRE 0/2 - w ELEVEE

			ANGLE D'INCLINAISON DE LA PAROI θ_p (°)												
			20				30				40				
			Nom Essai	A (cm)	w (%)	Observation	Nom Essai	A (cm)	w (%)	Observation	Nom Essai	A (cm)	w (%)	Observation	
D i m e n s i o n à l a b a s e D	4						DOD 37	7	8.3	Voûte à 5 g Rupture à 6.7 g	DOD 42	5	7.8	Voûte à 5 g Rupture à 7.3 g	
	6									DOD 43	7.2	8.4			
	6	10					DOD 38	5	8.3						
	10		DOD 45	5	8	Pour voir influence de A	DOD 40	5	8.3						
			DOD 46	3	8										
	15		DOD 47 et DOD 48	5		Pour répétiti- vité	DOD 41	5	7.8		DOD 44	5	8.3		

Tableau e.5 - ESSAIS EFFECTUES EN MODE TRANVERSAL

Nom Essai	Type Trémie	θ (°)	D (cm)	A (cm)	Matériau	w (%)	Observation
DOD 49	E X T R A C T I O N	20	10	6	sable	6.7	Pour répétitivité
DOD 50					broyé		
DOD 51					de Loire	4.3	
DOD 53						6.3	
DOD 52					sable roulé de Loire	3.3	

Tableau e.6 - ESSAIS EFFECTUES AVEC DES CONFIGURATIONS - TYPE

Nom Essai	Con-fig.	θ_a (°)	θ_r (°)	D (cm)	A (cm)	Matériau	w (%)	h cm	Observation
DOD 64	S A E	42	42	8.2	9.1	Sable roulé de Loire	2.8	41	Pour répétitivité
DOD 65						Sable broyé de Loire			
DOD 66							4.2		
DOD 59	D I B F I F P U .	37	12	17.5	6.6	Sable broyé de Loire	2.8	46	
DOD 60						Sable broyé de Loire	4.2		

E.2.2 - Résultat du traitement des enregistrements des pesons

Tableau e.7

Nom Essai	Poids total daN	Ec type poids	Vitesse tapis m/mn	Ec type vitesse	Temps vid. Sec	Debit Modele daN/sec	Debit Proto. t / h
DOD6	100.94	9.11	6.92	.34	19.81	5.10	93.6
DOD7	125.80	5.71	6.86	.32	32.32	3.89	71.4
DOD8	121.39	4.93	7.18	.27	41.41	2.93	53.8
DOD9	107.79	5.47	6.15	.60	21.21	5.08	93.2
DOD10	105.71	9.73	7.53	.44	30.35	3.48	63.9
DOD11	110.05	9.82	7.10	.39	31.17	3.53	64.8
DOD12	125.04	8.49	6.26	.75	21.63	5.78	106.1
DOD13	161.32	12.33	9.13	1.00	16.92	9.53	174.7
DOD14	128.75	10.66	8.74	.24	45.57	2.83	51.9
DOD15	152.73	11.66	9.26	.59	17.90	8.53	156.5
DOD16	123.75	5.69	8.72	1.07	14.49	8.54	156.7
DOD17	143.20	6.21	8.37	1.46	17.63	8.12	149.0
DOD18	145.89	8.85	8.38	1.26	18.22	8.01	148.6
DOD19	141.97	16.06	8.52	1.30	17.74	8.00	146.8
DOD21	130.53	5.79	8.66	1.52	17.08	7.64	140.2
DOD22	108.43	3.65	9.26	.82	13.55	8.00	146.8
DOD23	117.38	6.00	8.70	.28	36.57	3.21	58.9
DOD25	115.10	8.35	8.30	.36	26.81	4.29	78.7
DOD26	109.53	7.77	10.18	1.15	11.02	9.94	182.4
DOD27	161.77	5.14	9.20	1.08	20.74	7.80	143.1
DOD28	123.85	3.24	8.98	1.88	28.00	4.42	81.1
DOD29	115.45	3.12	9.49	.28	24.75	4.66	85.5
DOD32	104.21	10.87	9.18	.63	15.04	6.93	127.2
DOD33	95.37	5.03	8.41	.69	16.12	5.91	108.4
DOD34	128.43	6.16	8.47	.89	18.37	6.99	128.3
DOD35	125.30	8.06	8.51	.90	18.44	6.80	124.8
DOD36	125.00	10.04	8.99	.42	27.49	4.55	83.5
DOD37	133.97	1.65	7.57	.63	21.18	6.33	116.1
DOD38	102.51	6.31	9.03	.67	16.92	6.06	111.2
DOD40	127.08	6.01	9.34	.87	17.45	7.28	133.6
DOD41	147.63	4.49	8.52	.96	19.52	7.56	138.7
DOD42	140.78	2.32	8.30	.31	35.34	3.98	73.0
DOD43	122.89	6.66	8.40	.46	21.24	5.79	106.2
DOD44	171.67	5.63	8.61	.94	21.85	7.86	144.2
DOD45	110.22	6.99	8.69	.93	14.85	7.42	136.1
DOD46	112.63	5.81	9.43	.60	22.95	4.91	90.1
DOD47	132.15	6.67	7.65	1.48	18.88	7.00	128.4
DOD48	130.78	4.19	7.63	1.38	18.52	7.06	129.5
DOD49	109.73	2.07	7.91	.81	21.03	5.22	95.8
DOD50	100.24	3.11	7.75	.98	19.77	5.07	93.0
DOD51	137.85	9.68	7.80	.84	25.61	5.38	98.7
DOD52	139.78	8.29	7.80	.66	23.48	5.95	109.2
DOD53	146.07	8.70	8.47	.70	24.54	5.95	109.2
DOD54	151.05	6.21	5.62	.95	29.9	5.05	92.7
DOD55	146.45	5.72	6.93	.74	23.6	6.20	113.8
DOD56	147.80	6.00	6.88	.82	23.7	6.24	114.5
DOD57	145.33	3.88	7.04	.84	22.5	6.45	118.3
DOD58	147.41	5.01	7.12	.89	23.2	6.35	116.5
DOD64	141.75	4.05	9.07	.91	14.5	9.78	179.4
DOD65	142.11	3.15	6.8	.79	17.6	8.05	147.7
DOD66	138.07	6.47	6.9	.78	19.2	7.20	132.1

E.2.3 - Etalonnage du capteur de vitesse du tapis

figure e.1

