

TAILINGS DAMS. TRANSPORT PLACEMENT AND DECANTATION

Review and recommendations

DÉPÔTS DE STÉRILES. TRANSPORT MISE EN PLACE ET DÉCANTATION

Synthèse et recommandations

Bulletin 101



1995

Original text in English
French translation finalized by Y. Le May.
Texte original en anglais
Traduction en français mise au point par Y. Le May.

TAILINGS DAMS. TRANSPORT PLACEMENT AND DECANTATION

DÉPÔTS DE STÉRILES. TRANSPORT MISE EN PLACE ET DÉCANTATION

Commission Internationale des Grands Barrages - 151, bd Haussmann, 75008 Paris
Tél. : (33-1) 40 42 67 33 - Télex : 641320 ICOLD F - Fax : (33-1) 40 42 60 71

AVERTISSEMENT – EXONERATION DE RESPONSABILITE:

Les informations, analyses et conclusions auxquelles cet ouvrage renvoie sont sous la seule responsabilité de leur(s) auteur(s) respectif(s) cité(s).

Les informations, analyses et conclusions contenues dans cet ouvrage n'ont pas force de Loi et ne doivent pas être considérées comme un substitut aux réglementations officielles imposées par la Loi. Elles sont uniquement destinées à un public de Professionnels Avertis, seuls aptes à en apprécier et à en déterminer la valeur et la portée et à en appliquer avec précision les recommandations à chaque cas particulier.

Malgré tout le soin apporté à la rédaction de cet ouvrage, compte tenu de l'évolution des techniques et de la science, nous ne pouvons en garantir l'exhaustivité.

Nous déclinons expressément toute responsabilité quant à l'interprétation et l'application éventuelles (y compris les dommages éventuels en résultant ou liés) du contenu de cet ouvrage.

En poursuivant la lecture de cet ouvrage, vous acceptez de façon expresse cette condition.

NOTICE – DISCLAIMER :

The information, analyses and conclusions referred to herein are the sole responsibility of the author(s) thereof.

The information, analyses and conclusions in this document have no legal force and must not be considered as substituting for legally-enforceable official regulations. They are intended for the use of experienced professionals who are alone equipped to judge their pertinence and applicability and to apply accurately the recommendations to any particular case.

This document has been drafted with the greatest care but, in view of the pace of change in science and technology, we cannot guarantee that it covers all aspects of the topics discussed.

We decline all responsibility whatsoever for how the information herein is interpreted and used and will accept no liability for any loss or damage arising therefrom.

Do not read on unless you accept this disclaimer without reservation.

COMMITTEE ON MINE AND INDUSTRIAL TAILINGS DAMS
COMITÉ DES BARRAGES DE STÉRILES MINIERS ET INDUSTRIELS
(1989-1995)

Chairman/Président Great Britain/Grande-Bretagne	A. D. M. PENMAN
Members/Membres	
Australia/Australie	M. D. FITZPATRICK (1) J. PHILIPS (2)
Brazil/Brésil	F. MIGUEZ DE MELLO
Bulgaria/Bulgarie	C. B. ABADJIEV
Canada/Canada	E. J. KLOHN
Chile/Chili	G. NOGUERA
China/Chine	LIU Zhejun (3)
France/France	J.-M. DUPAS
Germany/Allemagne	J. BRAUNS
Italy/Italie	F. CAPOZZA (4) G. RUGGERI (5)
South Africa/Afrique du Sud	J. R. WILLIAMSON
Sweden/Suède	J. EURENIUS
USA/États-Unis	E. S. SMITH (6) S. G. VICK (7)

(1) Member until 1993/Membre jusqu'en 1993.

(2) Member since 1993/Membre depuis 1993.

(3) Member since 1993/Membre depuis 1993.

(4) Member until 1993/Membre jusqu'en 1993.

(5) Member since 1993/Membre depuis 1993.

(6) Member until 1991/Membre jusqu'en 1991.

(7) Member since 1991/Membre depuis 1991.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS

1. TRANSPORT DES STÉRILES

2. MISE EN PLACE DES
STÉRILES

3. OUVRAGES DE
DÉCANTATION DES
BARRAGES DE STÉRILES

4. RÉFÉRENCES

ANNEXES

CONTENTS

FOREWORD

1. TAILINGS TRANSPORT

2. TAILINGS PLACEMENT

3. TAILINGS DAM DECANT
SYSTEMS

4. REFERENCES

APPENDICES

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	10
1. TRANSPORT DES STÉRILES	12
1.1. Transport par voie humide (boues)	12
1.1.1. Transport par conduite	12
1.1.2. Pompes à boue	26
1.1.3. Transport gravitaire à surface libre	28
1.2. Transport par voie sèche	28
2. MISE EN PLACE DES STÉRILES	32
2.1. Mise en place par cyclone	32
2.1.1. Limites d'application de la méthode	32
2.1.2. Méthodes de mise en place par cyclone	36
2.1.3. Difficultés susceptibles d'être rencontrées	38
2.2. Mise en place par déversement au moyen de buses (spigots)	46
2.2.1. Conditions d'application de la méthode	46
2.2.2. Dimensionnement des buses de déversement	46
2.2.3. Principes de la méthode	48
2.2.4. Difficultés susceptibles d'être rencontrées	50
2.3. Mise en place au moyen d'enclos (cuvettes)	52
2.3.1. Généralités	52
2.3.2. Conditions requises	54
2.3.3. Difficultés susceptibles d'être rencontrées	58
2.3.4. Méthode cellulaire	58
2.4. Mise en place par moyens mécaniques	58
2.4.1. Généralités	58
2.4.2. Limites d'application	60
2.4.3. Difficultés susceptibles d'être rencontrées	60
3. OUVRAGES DE DÉCANTATION DES BARRAGES DE STÉRILES	64
3.1. Conception des ouvrages de maîtrise de l'eau	64
3.2. Conception des ouvrages de décantation	72
3.2.1. Conception hydraulique	72
3.2.2. Puits et conduite sous remblai	76
3.3. Conditions d'abandon des ouvrages de décantation	78

TABLE OF CONTENTS

FOREWORD	11
1. TAILINGS TRANSPORT	13
1.1. Slurries	13
1.1.1. Transport by pipeline	13
1.1.2. Slurry pumps	27
1.1.3. Transport by open gravity flume	29
1.2. Dry tailings	29
2. TAILINGS PLACEMENT	33
2.1. Cyclone deposition	33
2.1.1. Limits of applicability of cyclone deposition methods	33
2.1.2. Methods of placement with cyclones	37
2.1.3. Cyclone deposition difficulties	39
2.2. Spigot discharge dam building technique	47
2.2.1. Review of spigotting applicability	47
2.2.2. Spigot design	47
2.2.3. Spigotting fundamentals	49
2.2.4. Spigotting placement difficulties	51
2.3. Paddock deposition systems	53
2.3.1. General	53
2.3.2. Review of requirements for paddocking	55
2.3.3. Summary of paddocking placement difficulties	59
2.3.4. Cell construction	59
2.4. Mechanical placement of tailings	59
2.4.1. General	59
2.4.2. Limits of applicability of mechanically placed tailings	61
2.4.3. Deposition problems relating to mechanically placed tailings	61
3. TAILINGS DAM DECANT SYSTEMS	65
3.1. Design of water control systems	65
3.2. Design of the decant penstock and outfall pipe	73
3.2.1. Hydraulic design	73
3.2.2. The decant penstock shaft and outfall pipe	77
3.3. Closure conditions for decant penstocks and outfall pipes	79

4. RÉFÉRENCES	86
ANNEXES	89
Annexe A - Hydraulique des déversoirs	90
Annexe B - Dimensionnement des puits et des conduites de décantation sous remblai	92

4. REFERENCES	86
APPENDICES	89
Appendix A - Hydraulics of spillways	91
Appendix B - Structural design of decant penstock towers and outfalls	93

LISTE DES FIGURES

- Fig. 1. – Classification des boues.
- Fig. 2. – Perte de charge par frottement en fonction de la vitesse d'écoulement (boue homogène).
- Fig. 3. – Perte de charge par frottement en fonction de la vitesse d'écoulement (boue hétérogène).
- Fig. 4. – Cyclone local.
- Fig. 5. – Réglage du diamètre de l'ajutage (débit de fond).
- Fig. 6. – Barrage de stériles construit par cyclonage - Exemples de courbes de hauteur.
- Fig. 7. – Rythme de montée admissible en fonction de la densité relative de la boue de stériles.
- Fig. 8. – Schéma des différentes zones hydrologiques composant une zone de dépôt de stériles.
- Fig. 9. – Représentation schématique du bilan hydraulique d'un dépôt de stériles.
- Fig. 10. – Deux types classiques de puits d'évacuation.
- Fig. 11. – Contraintes appliquées sur le fût d'un puits d'évacuation.
- Fig. 12. – *a)* Méthode de pose de la conduite en tranchée pour obtenir une réduction des contraintes par effet de voûte - *b)* Méthode d'ancrage de la conduite pour contre-carrer la poussée ascendante.
- Fig. 13. – Méthodes d'obturation des puits.
- Fig. 14. – Abandon - Massif à l'exutoire de la conduite.
- Fig. 15. – *a)* Pression externe appliquée sur un cylindre vide - *b)* Réduction de la pression par pose de la conduite en tranchée.

LIST OF FIGURES

- Fig. 1. – Classification of slurries.
- Fig. 2. – Friction loss vs. velocity for a homogeneous slurry.
- Fig. 3. – Friction loss vs. velocity for a heterogeneous slurry.
- Fig. 4. – On-dam cyclone.
- Fig. 5. – Variation of the underflow diameter.
- Fig. 6. – Typical stage curves for a cycloned tailings dam.
- Fig. 7. – Allowable rate of rise vs. specific gravity of delivered tailings slurry.
- Fig. 8. – Diagrammatic representation of hydrological components for a residue deposit.
- Fig. 9. – Diagrammatic representation of the water balance for a residue deposit.
- Fig. 10. – Two common types of shaft penstock.
- Fig. 11. – Stresses acting on a penstock shaft.
- Fig. 12. – *a)* Method of laying penstock outfall in trench to achieve lower stresses by “negative projection” - *b)* Method of anchoring pipe against floating.
- Fig. 13. – Methods of closing or plugging penstocks.
- Fig. 14. – Penstock closure - Buttress.
- Fig. 15. – *a)* External pressure on an empty cylinder - *b)* Pressure relief by bedding pipe in a trench.

AVANT-PROPOS

Le choix de l'implantation et de la méthode de construction d'un barrage de stockage de stériles dépend, pour une grande part, du mode de transport des matériaux depuis l'usine de traitement.

Le présent Bulletin donne des recommandations sur le transport des stériles par voie humide (conduites, canaux) ou voie sèche. L'écoulement peut se faire par gravité, et/ou avec utilisation de pompes dont les divers types sont examinés. La séparation des éléments grossiers des stériles, destinés à la construction du barrage, fait appel à divers moyens : cyclonage, séparation gravitaire sur une plage après déversement par des buses, méthode semi-aérienne utilisant des rampes d'aspersion. Lorsque les stériles ne contiennent pas suffisamment d'éléments grossiers pour permettre la construction du barrage par les procédés sus-mentionnés, on peut utiliser la méthode des enclos (cuvettes). Celle-ci est bien adaptée aux régions à forte évaporation.

Le Bulletin traite ensuite du transport et de la mise en place par moyens mécaniques, pour les stériles produits à l'état « sec » ou traités par presses filtrantes ou filtres sous vide. Le compactage mécanique améliore les caractéristiques mécaniques des stériles servant à la construction du barrage; il s'applique aussi aux stériles grossiers mis en place par cyclonage ou déversement par des buses.

La plupart des ruptures de barrages de stériles résultent d'une montée excessive du niveau de l'eau dans la retenue, provoquant une émergence de la ligne de saturation sur le talus aval, ou, dans des cas extrêmes, un déversement sur la crête du barrage. Il importe donc de disposer d'un déversoir ou d'un ouvrage de décantation, correctement conçu, afin d'évacuer de la retenue les eaux de pluie ou de traitement.

Le Bulletin présente une méthode d'évaluation du bilan hydraulique global d'une retenue et de dimensionnement d'un ouvrage d'évacuation présentant toute sécurité. Il donne également des recommandations sur la conception des divers types d'ouvrage – y compris le calcul du débit sur un seuil circulaire, et le calcul de résistance des puits de décantation et des conduites sous remblai soumis à des pressions externes et à des sollicitations verticales imposées par les stériles stockés. Enfin, on indique les précautions à prendre, lors de la fermeture du dépôt de stériles, pour assurer la sécurité à long terme des ouvrages d'évacuation.

Une bibliographie donne une liste de documents très intéressants à consulter.

Ce Bulletin a été préparé par le Sous-Comité des Barrages de Stériles du Comité Sud-Africain, sous la présidence de M. J. R. G. Williamson. Nous l'en remercions vivement, ainsi que la Chambre des Mines d'Afrique du Sud et les Comités Nationaux qui ont présenté des commentaires intéressants.

A. D. M. Penman
Président du Comité des Barrages
de Stériles Miniers et Industriels

FOREWORD

The position chosen to site a new tailings impoundment and its method of construction are strongly related to the way the tailings are to be transported from the processing plant.

This Bulletin gives advice on tailings transportation as a slurry in pipes and open flumes, as well as consideration of the "dry" condition. Flow may be caused by gravity and/or pumps and pump types are discussed. The coarse fraction from the tailings for dam construction may be separated out by use of cyclones or by gravity separation on a beach when discharged from spigots or spray bars to achieve sub-aerial deposition. When the tailings contain insufficient coarse fraction for successful dam construction by the above methods, the paddock deposition system can be used. This method is particularly useful in areas where climatic conditions cause a high net evaporation.

Tailings passed through filter presses or vacuum filters to reduce water content or tailings produced "dry" can be transported and placed mechanically. Machine compaction can greatly improve the strength of tailings used in dam construction and mechanical compaction can also be applied to coarse tailings that have been placed by cyclone or spigotting.

When failures of tailings dams occur, it has been found that the majority have been due to excessive rise of water level, causing the phreatic surface to reach the downstream slope or, in extreme cases, causing free water in the lagoon to reach or even pass over the crest of the dam. This fact emphasises the need for a correctly designed spillway or decant system to safely remove storm and process water from the impoundment.

This Bulletin describes a method for assessing the overall water balance of impoundment and the way the requirements for a safe discharge system can be calculated. It also gives advice on the design of various types of system, including calculations of discharge over an annular weir and the design of culverts and decant towers to withstand external pressures and downdrag forces imposed by the impounded tailings. Recommendations are made about the suitable conditions of and requirements for spillways left at closure to ensure the safety of a rehabilitated impoundment.

A particularly valuable collection of papers are given as references at the end of the Bulletin.

The Bulletin was prepared in South Africa and thanks are due to Mr. J. R. G. Williamson and his SANCOLD Sub-committee with acknowledgement to the S.A. Chamber of Mines and the many ICOLD National Committees who have made valuable comments.

A. D. M. Penman
Chairman, Committee on Mine
and Industrial Tailings Dams

1. TRANSPORT DES STÉRILES

Les méthodes classiques de transport des stériles depuis l'usine de traitement jusqu'à la zone de dépôt sont les suivantes.

1.1. TRANSPORT PAR VOIE HUMIDE (BOUES)

1.1.1. Transport par conduite

Les boues sont acheminées par conduite, en utilisant :

- soit des pompes, fournissant la force motrice,
- soit la gravité (en cas de pente suffisante du terrain).

Dans les deux cas, l'analyse préalable des boues permet la détermination, d'une part, de leurs caractéristiques principales et, d'autre part, des valeurs à prendre dans les calculs (perte de charge par frottement, vitesse critique de sédimentation pour les suspensions hétérogènes, vitesse critique de passage du régime laminaire au régime turbulent pour les boues pseudo-homogènes).

Généralement, après une première analyse d'échantillons dans un laboratoire spécialisé, et selon la longueur de la conduite et son influence sur le fonctionnement de l'installation, on décide de la meilleure méthode de calcul de la conduite.

Pour un tracé relativement court (jusqu'à 8 km, par exemple) sans grande influence sur les conditions d'exploitation de l'usine, on peut se contenter de méthodes de calcul empiriques. Par contre, si la conduite a une grande longueur ou une forte influence sur les conditions d'exploitation, on préfère des essais sur modèle réduit (boucle d'essai). Le diamètre de la conduite utilisée pour ce modèle doit s'approcher le plus possible de celui du prototype afin de s'affranchir des incertitudes découlant de l'extrapolation des résultats.

La sensibilité des résultats aux variations de la granulométrie et de la concentration de la boue sera évaluée au moyen d'un programme d'essai.

Le choix et l'optimisation du dispositif de transport (tracé, diamètre, matériaux, type des pompes) conditionnent son bon fonctionnement dans le temps. Il y a un grand nombre de paramètres à prendre en compte, qui sont traités en détail dans les documents cités en référence.

Les difficultés découlant du mauvais choix du diamètre de la conduite sont : usure excessive (diamètre trop faible) ou sédimentation et colmatage (diamètre trop grand). De même, le tracé doit éviter les pentes trop abruptes et les points bas (risque de colmatage lors des arrêts).

1. TAILINGS TRANSPORT

Transportation and delivery of tailings from prime source to the waste disposal area is generally achieved in the following ways.

1.1. SLURRIES

1.1.1. Transport by pipeline

Slurry may be transported by pipeline using either

- a) pumps to provide the necessary driving head, or
- b) gravity head, in the case of a suitable downhill pipeline.

Both require an analysis of the slurry to firstly determine its primary characteristics, and secondly the applicable slurry friction gradients and critical deposit velocities (in the case of heterogeneous slurry suspensions) or laminar/turbulent transition point (in the case of pseudo-homogeneous slurries).

Generally, samples of the tailings would be submitted to a slurry laboratory for preliminary analysis, and then, depending on the length and operational sensitivity of the pipeline, a decision would be taken on how the final slurry pipeline analysis should proceed.

If the pipeline is relatively short (say up to 8 km in length) and it is not a critical element in the operational operation of the plant in question, then final design can be done using empirically derived methods of analysis. However, in the case of longer or more critical pipelines, laboratory pipe loop testing of the slurry is recommended. The diameter of the pipe in the loop should be as close as possible to that of the prototype, in order to avoid the uncertainty of scale-up of test results.

Sensitivity of the results to variations in particle size distribution and slurry concentration should be evaluated in the test programme.

The optimisation and selection of the most efficient pipeline transportation system, pipeline route, pipe size, pipe materials, and slurry pumps for the required duty is critical to the long term success of any slurry pumping system. There are many factors that need careful assessment, and these are covered fully in the bibliography references.

Incorrect selection of pipe size can lead to excessive wear in the case of undersized pipes, and deposition and plugging problems in the case of oversized pipes. Similarly, pipe route selection should avoid excessive slopes and valleys in order to prevent clogging on shutdown.

Un choix correct des matériaux constitutifs et des accessoires (joints, supports) est essentiel au bon fonctionnement de la conduite.

Il y aura lieu également de prévoir des moyens de nettoyage de la conduite par chasse d'eau, après un arrêt, ainsi que des points intermédiaires d'évacuation des produits de curage et des barrages de captage.

Les phases d'étude d'une conduite de transport des boues sont résumées schématiquement ci-dessous :

Données préliminaires

- Débit solide à transporter (en poids), fourchette de variation.
- Granulométrie et densité des éléments solides.
- Milieu porteur (eau, ...).
- Estimation de la concentration en éléments solides dans le milieu porteur, et variations probables.
- Longueur de la conduite, profil longitudinal du tracé, charge statique.

Une fois ces données recueillies, on doit caractériser le mélange diphasique (solide/liquide). Cette démarche est schématisée ci-dessous :

Écoulement homogène (ou pseudo-homogène)

Il s'agit généralement d'une granulométrie très fine (fraction prédominante inférieure à 300 μ) en suspension dans le milieu porteur, avec répartition uniforme en concentration et en granulométrie sur toute la hauteur de la section de la conduite, au cours du transport.

Écoulement hétérogène

Dans ce cas, les solides en suspension ne présentent pas une répartition verticale uniforme sur la hauteur de la section. En effet, la concentration ainsi que la grosseur des particules augmentent depuis la génératrice supérieure de la conduite jusqu'au fond. C'est la condition la plus courante pour les stériles miniers. La fraction > 300 μ est prédominante.

Saltation

Les particules avancent par bonds successifs sur le fond.

Glissement

Les particules avancent par glissement sur le fond.

La classification des boues est schématisée sur la Fig. 1.

Écoulement des boues stables (boues homogènes)

Les suspensions stables (sédimentation nulle) sont généralement classées comme fluides non-newtoniens.

Correct selection of piping material, pipe fittings and pipeline supports is essential if a successful slurry pipeline is to result.

It must also be borne in mind that some means of flushing the pipeline clean after a stoppage should be provided, as well as intermediate flushing discharge points and catch dams.

Steps in approaching a slurry pipeline design can be generalised as follows :

Preliminary data required

- Mass rate of solids to be transported (and range).
- Size distribution of solid particles. S.G. (specific gravity) of solid particles.
- Transporting medium. Water or other?
- Expected concentration of solids in transporting medium (and likely variation in concentration).
- Length of pipeline. Profile of route. Static head.

Once this data is to hand it is necessary to classify the nature of the solid/liquid slurry, which can be broadly done as follows :

Homogeneous flow (or pseudo-homogeneous flow)

Generally applies to very fine particles of predominant size less than 300 micron which are suspended in the carrying fluid in such a way in the pipe cross section that there is uniform concentration and size distribution from top to the bottom of the pipe during transportation.

Heterogeneous flow

Here the suspended solids do not have a uniform distribution or concentration from top to bottom of the pipe. The slurry concentration and particle size is greater towards the bottom of the pipe. This is the most common classification for mine tailings. Particle size is predominantly greater than 300 microns.

Saltation

The particles move in the pipe by consecutive bounces along the bottom.

Sliding bed

The particles move along the bottom of the pipe in a sliding action.

Fig. 1 shows a detailed classification of slurries.

Flow of non settling (homogeneous slurries)

These slurries generally fall into the definition of non-Newtonian fluids.

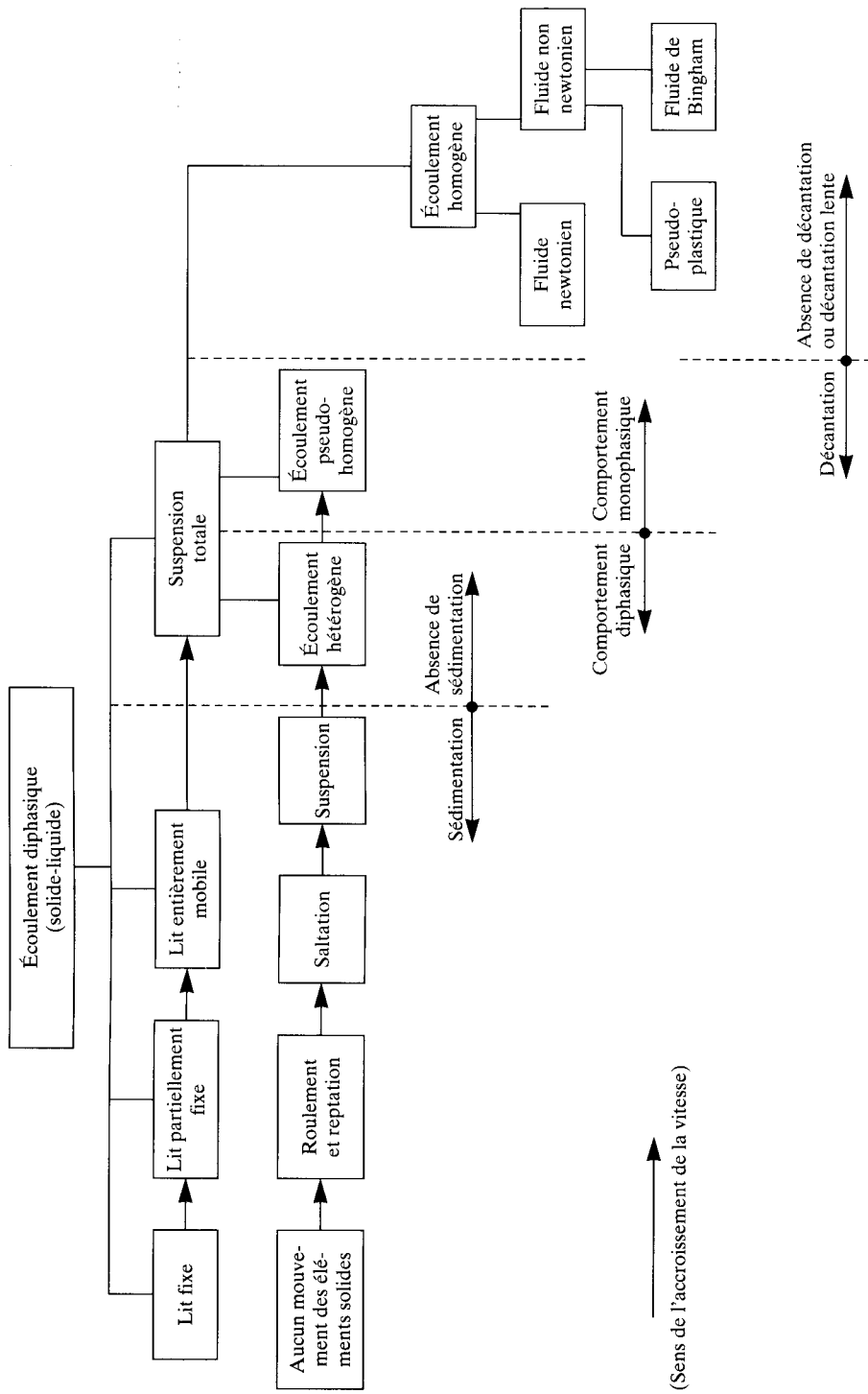


Fig. 1 - Classification des boues

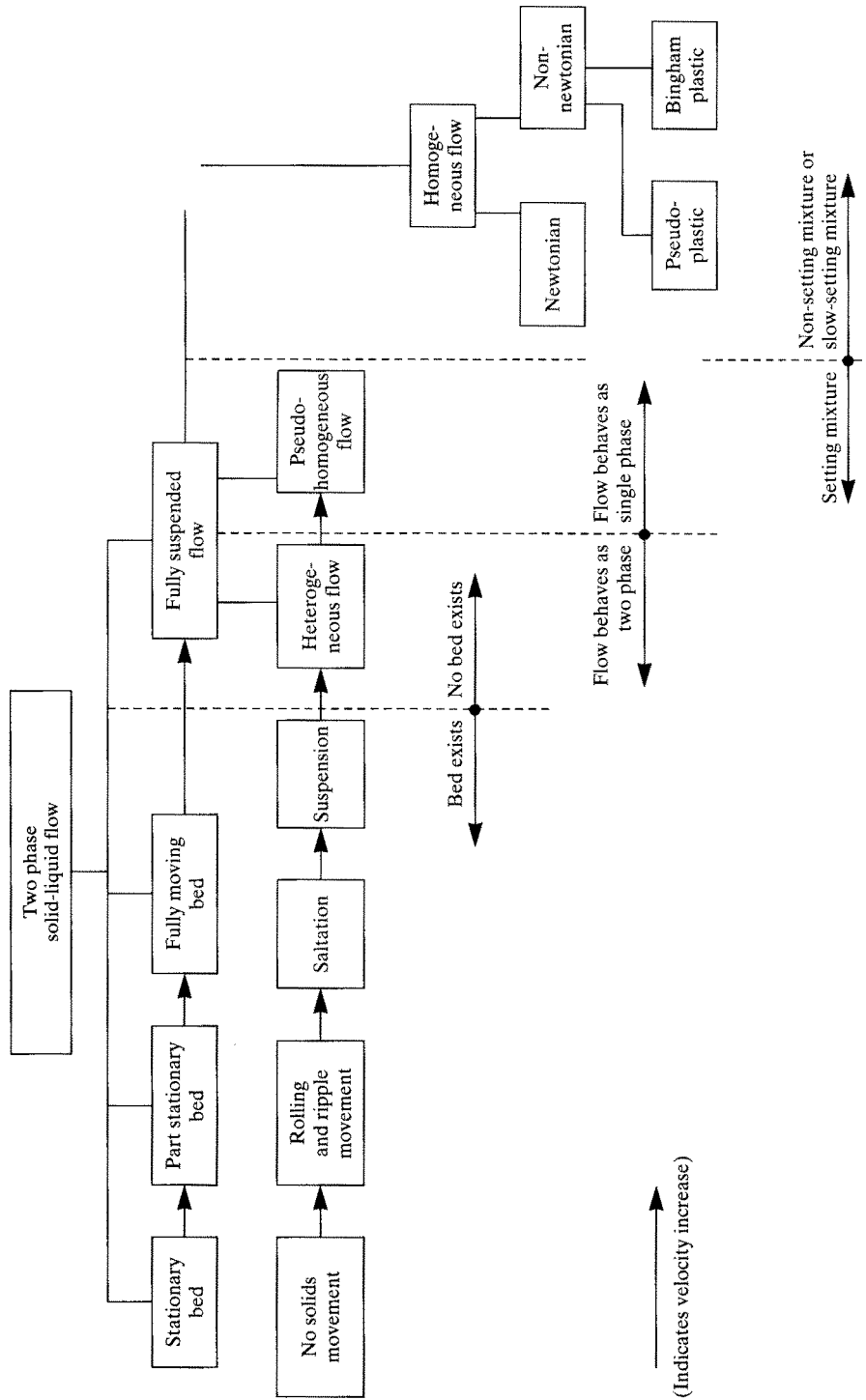
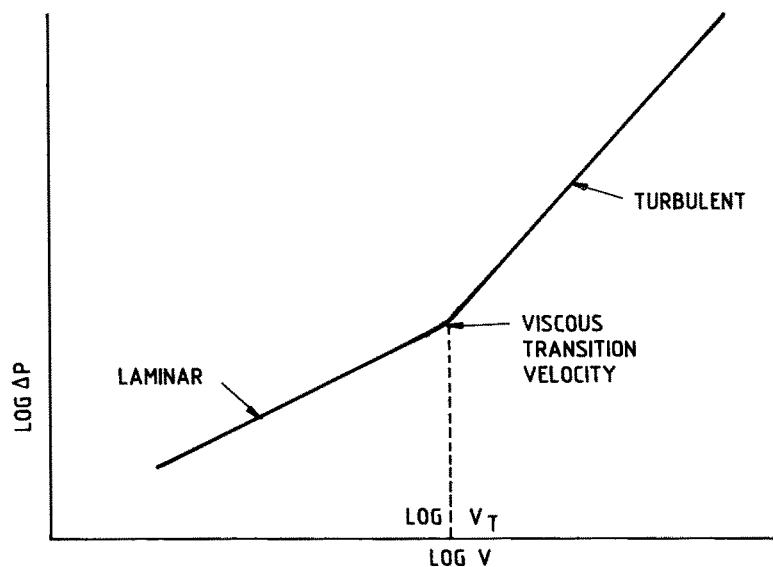


Fig. 1 - Classification of slurries

Il existe une vaste bibliographie concernant l'écoulement des boues; c'est une science relativement exacte. Une référence utile est la publication de Govier & Aziz [5].

La classification d'une boue dépend de l'allure de la courbe des contraintes de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement, établie à partir d'essais en laboratoire, à l'aide de l'un des divers viscomètres disponibles.

Le régime d'écoulement des boues pseudo-homogènes peut être laminaire ou turbulent. Un exemple de la courbe des pertes de charge par frottement en fonction de la vitesse, avec passage, à la vitesse V_T , du régime laminaire au régime turbulent, est donné sur la Fig. 2.



Pour le passage aux conditions réelles du prototype, l'extrapolation mathématique des résultats des essais en laboratoire est assez fiable, tant que la différence d'échelle n'est pas excessive.

La méthode d'étude d'un dispositif de transport d'une boue de type homogène ou pseudo-homogène comporte généralement les étapes suivantes :

a) Analyses en laboratoire :

- granulométrie,
- densité des éléments solides,
- caractéristiques de la boue (contrainte de cisaillement en fonction de la viscosité apparente) pour différentes températures et concentrations,
- caractéristiques du comportement de la boue,

This broad aspect of slurry flow is well documented and is a relatively exact science. A useful reference in this respect is that published by Govier & Aziz [5].

The classification of the slurry characteristic is determined from the shape of the shear stress vs shear rate curve as determined from laboratory tests using one of the many types of slurry viscometers available.

Flow of pseudo homogeneous slurries can occur in both the laminar and turbulent regions. A typical friction head vs flow velocity curves illustrating the change from laminar to turbulent flow at the transition velocity V^D is illustrated in Fig. 2.

Fig. 2

Friction loss vs. velocity for a homogeneous slurry

Perte de charge par frottement en fonction de la vitesse d'écoulement (boue homogène)

Laminar
Turbulent

Viscous transition velocity

Écoulement laminaire

Écoulement turbulent

*Vitesse de changement de régime
(fluide visqueux)*

Scale-up of laboratory tests results to full scale installations can be done mathematically with relative confidence providing the degree of scale up is not too large.

A designer faced with the design of a transportation system for a slurry falling into the homogeneous or pseudo homogeneous category will generally follow the following procedures :

- a) Submit sample for laboratory analysis in respect of
 - Particle size distribution.
 - Particle S.G.
 - Slurry characteristics (shear stress vs apparent viscosity) at various concentrations and temperature.
 - Classification of behaviour of slurry.

– éventuellement, détermination de la perte de charge par frottement en régime laminaire à l'aide d'un viscosimètre à tube, voire d'un modèle réduit (boucle de tuyau de petit diamètre).

b) Analyse mathématique des résultats pour déterminer la perte de charge par frottement en fonction de la vitesse en régimes laminaire et turbulent, et à partir de là, déterminer la vitesse de changement de régime. Un soin particulier est à apporter au choix de la viscosité théorique et de la formule mathématique pour le calcul.

c) Choix du diamètre de la conduite en fonction de la boue à transporter. Si l'on constate une tendance à la sédimentation, on est parfois amené à choisir un diamètre assurant une vitesse d'écoulement légèrement supérieure à la vitesse de changement de régime.

d) Choix d'un équipement de pompage capable de fournir la pression nécessaire au bon fonctionnement de l'installation.

Écoulement des boues hétérogènes

Dans une suspension hétérogène, c'est l'écoulement turbulent du fluide porteur qui empêche les éléments solides de se déposer. Un aspect essentiel des calculs concerne la vitesse critique de sédimentation, c'est-à-dire la vitesse minimale assurant le maintien de la suspension hétérogène. C'est la vitesse minimale de bon fonctionnement du dispositif. Cependant, moyennant certaines mesures conservatoires au stade du projet, il est possible d'exploiter la conduite sur un fond de sédiments déposés.

Il faut noter que les paramètres influençant les pertes de charge par frottement dans un écoulement diphasique (solide/liquide) sont au nombre de 14, contre 5 seulement pour un fluide monophasique newtonien tel que l'eau.

Ainsi, la perte de charge par frottement est fonction des paramètres suivants :

- diamètre, rugosité et pente de la conduite,
- âge de la conduite (polissage) et taux de sédimentation dans la conduite,
- densité et viscosité du fluide porteur,
- densité, granulométrie, forme, répartition, et coefficient de restitution des éléments solides,
- débit solide moyen,
- débit liquide moyen,
- coefficient de la pesanteur.

Il y a eu de nombreuses recherches de lois expérimentales dans le domaine des écoulements hétérogènes.

La première corrélation de cette sorte, toujours reconnue comme représentant le meilleur modèle des écoulements hétérogènes, est celle de Durand & Condolius [6], publiée en 1952.

– Possibly determination of laminar friction loss in a tube viscometer or even a small bore test loop.

b) Undertake mathematical analysis of results to determine friction loss vs velocity characteristic in laminar and turbulent flow regions, and hence determination of transition velocity. In doing this care must be taken to select a representative viscosity and/or mathematical formula for the analysis.

c) Select pipe size that must be chosen to suit the characteristics of the slurry. This is sometimes just in excess of the transition velocity if some settling properties are evident.

d) Select a pumping system that will provide sufficient pumping head to meet the system duty point.

Heterogeneous slurry flow

Particles in heterogeneous suspension rely on the carrier fluid to have sufficient turbulence to hold them in suspension. An important calculation in heterogeneous flow is the critical deposition velocity as this is the lowest velocity at which the particles will remain in heterogeneous suspension and hence at which the system will safely operate. Providing care is taken at design stage it is also possible to operate a pipeline safely with a settled bed.

It is important to realise that the number of variables influencing the friction loss for two-phase solid/liquid flow is fourteen, compared with only five for a single phase Newtonian fluid such as water.

Friction loss becomes a function of

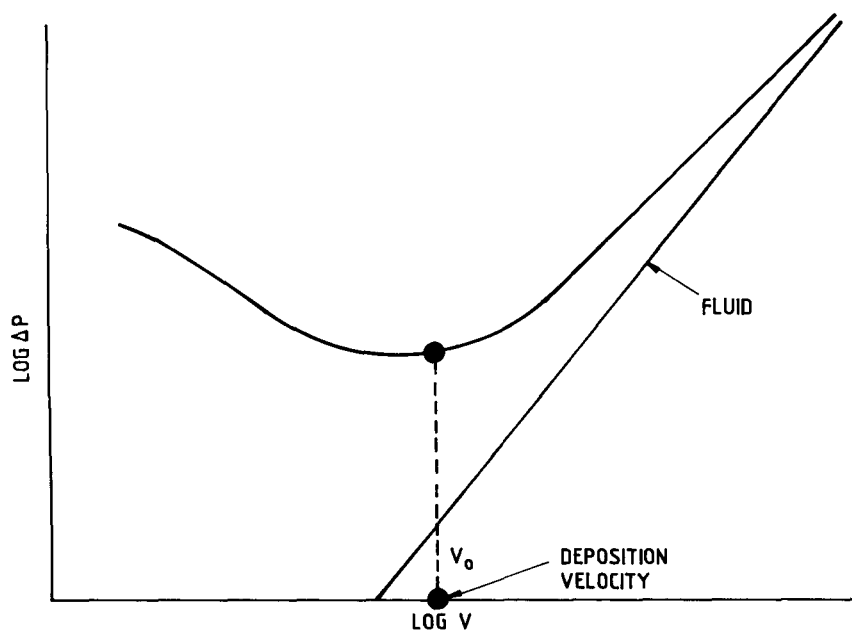
- pipe diameter, roughness and slope
- age of pipe (polishing) or degree of sedimentation in the pipe
- carrier fluid density and viscosity
- solid particle density, size distribution, shape, shape distribution and coefficient of restitution
- mean solids mass flow rate
- mean fluid mass flow rate
- gravitational constant.

Many researchers have attempted to correlate data from experimental tests for heterogeneous flow.

The forerunner of these which is still generally accepted today as providing the most representative model is that of Durand and Condolius [6] which was published in 1952.

Depuis cette date, on a proposé de nombreuses adaptations des lois de Durand, mais ces dernières restent valables dans leur forme générale. Il ne faut pas oublier qu'elles furent établies pour des particules de grosseur uniforme en suspension dans de l'eau claire.

A titre d'exemple, une courbe de perte de charge par frottement en fonction de la vitesse d'écoulement apparaît sur la Fig. 3. La vitesse critique de sédimentation V_0 correspond au point bas de la courbe de perte de charge; en-deçà de ce point, les pertes de charge augmentent en fonction de la réduction de la vitesse, car il y a sédimentation dans la conduite.



Dans les installations où des variations de volume ou de tonnage se présentent, on peut maintenir une vitesse adéquate de transport en ajoutant de l'eau dans le cas d'un faible volume, ou en utilisant deux conduites de diamètre différent, fonctionnant individuellement ou en association. La vitesse d'écoulement de la boue doit obligatoirement être supérieure à la vitesse critique de sédimentation afin d'éviter le colmatage de la conduite.

Écoulement complexe

Jusqu'ici, nous n'avons traité que des cas bien définis de boues pseudo-homogènes ou hétérogènes à granulométrie uniforme.

Dans la pratique, très peu de boues classées « hétérogènes » le sont vraiment, en raison de leur granulométrie étalée. En effet, les éléments fins peuvent être transportés dans un écoulement pseudo-homogène et les éléments plus grossiers

Many researchers since 1952 have proposed variations to the Durand equations for heterogeneous flow, but the basic format has withstood the test of time. It is, however, important to appreciate that the equations were developed for single sized particles suspended in clear water.

A typical friction head vs velocity curve for a heterogeneous slurry is shown in Fig. 3. The critical deposit velocity V_o is characterised by the minimum head loss value on the curve, after which the head loss increases again with decreasing velocity due to deposition of solids on to the floor of the pipe.

Fig. 3

Friction loss vs. velocity for a heterogeneous slurry

Perte de charge par frottement en fonction de la vitesse d'écoulement (boue hétérogène)

Fluid
Deposition velocity

Fluide
Vitesse de sédimentation

It is important that the slurry is transported at a velocity safely in excess of the deposit velocity in order to prevent pipeline blockage due to settled particles. In operating situations where volumetric or tonnage variations may occur, maintenance of a safe transport velocity can be catered for by addition of make-up water in the case of low volume, or the use of two pipelines of different size that can be selected individually or in combination.

Complex flow

Up to now only slurries that can be clearly categorised as being either pseudo homogeneous or heterogeneous, with single sized particles, have been considered.

In practice very few slurries in the heterogeneous range can be classified as being truly heterogeneous because of the wide range of particle size distribution which occurs. Thus the finer particles may be transported in pseudo-homogeneous

dans un écoulement hétérogène, mais ceux-ci restent en suspension dans le fluide porteur composite chargé d'éléments fins.

Pour cette raison, l'évaluation des pertes de charge par frottement et de la vitesse critique de sédimentation est délicate.

Plusieurs chercheurs, notamment Wasp [7] et Wilson [8], ont proposé des méthodes mathématiques visant à résoudre ce problème. Généralement, la boue est divisée en plusieurs composants :

- éléments en suspension pseudo-homogène, constituant une partie du fluide porteur composite,
- éléments transitant en suspension hétérogène dans le fluide composite,
- éléments charriés sur le fond.

Dans ces méthodes, il faut déterminer un coefficient de traînée représentatif C_D pour l'enveloppe granulométrique des éléments solides correspondant à la suspension hétérogène.

La frontière séparant les suspensions hétérogène et homogène dépendant de la vitesse d'écoulement de la boue en question, une approche itérative est nécessaire, et l'ordinateur devient ainsi un outil essentiel pour l'évaluation des pertes de charge par frottement et de la vitesse critique de sédimentation. Une telle approche est proposée par Williamson [9].

Pour le choix pratique des conduites et des pompes à prévoir pour une installation de transport complexe, on peut procéder comme suit :

a) Analyses en laboratoire :

- granulométrie, densité des particules,
- vitesse de sédimentation dans l'eau claire.

b) Calcul :

- du coefficient de traînée des éléments solides C_D (pour les éléments en suspension hétérogène),
- de la granulométrie de la fraction en suspension homogène, à la vitesse normale de fonctionnement, et des caractéristiques du fluide homogène (densité, viscosité),
- des pertes de charge par frottement pour le fluide porteur et la suspension hétérogène,
- de la vitesse critique de sédimentation de la boue.

Cette étude étant complexe et approximative, les résultats obtenus ne sont généralement fiables que pour les conduites de longueur relativement réduite, jusqu'à 10 km par exemple.

Pour les conduites plus longues et les installations délicates, on doit avoir recours à des essais sur modèle réduit. La boucle d'essai est construite, de préférence, avec des éléments de grandeur nature, car, dans le cas contraire, l'extrapolation des résultats risque d'introduire d'autres incertitudes.

flow, and the coarser particles in heterogeneous flow, but being suspended in a carrier fluid amended by the presence of the fine particles.

Thus the prediction of slurry friction loss and critical deposit velocity becomes a complex procedure.

Various workers such as Wasp [7] and Wilson [8] have developed mathematical procedures for dealing with the problem. The approach used is generally to split the slurry into its various components, i.e.

- the particles in pseudo-homogeneous suspension that then form part of an amended carrier fluid,
- particles transported in heterogeneous suspension in the amended carrier fluid,
- particles transported as a sliding bed.

Of importance in these procedures is the determination of a representative particle drag coefficient C_D for the range of particle sizes in heterogeneous suspension.

As the cut-off between heterogeneous and homogeneous suspension is a function of the slurry transport velocity, the procedures involved are iterative and the computer thus becomes an important tool for friction loss and critical deposition velocity predictions. One such procedure is that described by Williamson [9].

A designer faced with the requirements to select pipelines and pumps for a complex slurry transportation system may undertake the following procedure :

- a) Laboratory testing for
 - particle size distribution and particle S.G.
 - particle settling velocities in clear water.
- b) Mathematical procedures to determine
 - representative particle drag coefficient C_D for those particles in heterogeneous suspension,
 - particle sizes in homogeneous suspension at the design transport velocity and amended properties of homogeneous fluid (S.G., viscosity),
 - friction loss components for carrier fluid and heterogeneous suspension,
 - critical deposition velocity for the slurry.

As these procedures are complex and at best can only be considered to be good approximations, the results can generally only be used with confidence for relatively short pipelines of up to say 10 km in length.

The conditions applying for longer pipelines and for critical situations can only be determined with confidence by laboratory pipe loop testing. For this it is preferable to use full size pipelines, as scale-up procedures for test results may also be subject to uncertainties.

Il existe d'excellents ouvrages traitant du transport des boues par conduite, dont certains sont cités au chapitre 4.

1.1.2. Pompes à boue

On peut distinguer deux grandes familles de pompes à boue : *les pompes centrifuges* et *les pompes volumétriques*.

a) *Les pompes centrifuges* sont caractérisées par un grand débit, à pression relativement faible. Elles sont généralement utilisées lorsque la longueur de la conduite (entre stations relais) ne dépasse pas 12 à 14 km, et pour des concentrations et viscosités pas trop élevées.

b) *Les pompes volumétriques* atteignent des pressions très élevées, mais sont généralement limitées en débit. Elles sont généralement utilisées pour les conduites de grande longueur ou pour le transport de boues pâteuses (concentration et viscosité très élevées).

Il existe sur le marché un grand nombre de pompes de divers types et marques, spécialement étudiées pour le transport des boues. La méthodologie à suivre pour le choix des pompes, correspondant aux besoins identifiés lors des analyses ci-dessus, est traitée dans les ouvrages cités en référence, et on peut demander conseil aux fabricants et aux ingénieurs spécialistes.

Le mauvais choix des groupes moto-pompes risque de se solder par une usure excessive et des besoins importants en entretien, par le colmatage de la conduite, ou par l'impossibilité de redémarrer l'installation après arrêt.

Le choix du type de pompe à prévoir dépend :

- de la vitesse d'écoulement,
- de la pression demandée,
- de la granulométrie des éléments,
- de l'abrasivité des éléments,
- de la consistance de la boue.

La sélection d'un type centrifuge ou volumétrique dépend notamment de la pression de sortie demandée et de la granulométrie des éléments, les pompes centrifuges ne développant qu'une pression relativement faible, mais pouvant transiter des éléments plus grossiers qu'une pompe volumétrique.

Le choix d'une pompe centrifuge exige un grand soin. Le point de fonctionnement ne doit pas se situer sur une partie plate de la courbe, afin d'éviter des instabilités de fonctionnement. La vitesse périmétrale de la roue doit être limitée pour éviter l'usure par érosion. Une roue entièrement métallique est préférée lorsque les éléments solides de la boue sont gros ou anguleux. Dans le cas contraire, un revêtement interne (corps, roue) en caoutchouc ou en polyuréthane augmente la durée de vie.

There are extensive and excellent sources of literature on the subject of slurry transportation in pipelines. Selected references are given in Section 4 of this document.

1.1.2. Slurry pumps

Slurry pumps can be broadly categorised into two main group types, namely *centrifugal pumps* and *positive displacement pumps*.

a) *Centrifugal slurry pumps* : Can handle relatively high slurry volumes but at low pumping heads. Centrifugal pumps are generally used in applications where pipeline lengths (between booster stations) do not exceed 12 to 14 km, and where the slurry viscosity or concentrations are not too high.

b) *Positive displacement pumps* : Can develop very high pumping heads but generally are limited in volumetric pumping capacity. Are generally used for long distance pumping applications or for cases where high concentration, high viscosity slurries (pastes) are required to be transported.

There are many types and makes of pumps that have been specifically designed to handle slurries. The process for selection of the correct type of pump for the required duty as identified by the preceding slurry pumping analysis, is covered more fully in the bibliography references, and guidance can be obtained from commercial slurry pump suppliers or specialist designers.

Incorrect sizing of the duty pumps and their motor drives can lead to excessive wear and maintenance requirements, to pipeline clogging and inability to re-start after pipeline shutdown.

The choice of pump for the required slurry pumping duty depends on :

- flow rate
- required pumping pressure
- solid particle size
- particle abrasivity
- slurry consistency.

The basic choice between centrifugal and positive displacement pumps depends primarily on the required discharge pressure and particle size, as centrifugal pumps only have a very limited casing pressure rating, but can handle larger particles than a positive displacement pump.

The centrifugal slurry pump must be chosen with care. The duty point should not be on a flat portion of the pump curve, in order to avoid operating instability. The impeller tip speed should be limited in order to prevent excessive erosion wear. An all-metal impeller should be used when larger or sharply angular particles are present. In other cases, rubber or polyurethane lining of the casing and/or the impeller can increase wear life.

Enfin, il est essentiel d'ajouter une marge sur les performances théoriquement nécessaires, pour tenir compte des pertes de charge dues aux effets de la granulométrie et de la concentration en éléments solides; de même, la puissance du moteur d'entraînement doit tenir compte de la densité de la boue à transporter.

La pompe centrifuge est bien adaptée au transport à grand débit sur de faibles distances, et la durée de vie est excellente si la pompe est bien choisie et dimensionnée.

Les pompes volumétriques sont de différents types :

- pompe à piston plongeur (boues fines abrasives, pression élevée),

- pompe à piston (boues fines, pression élevée),
- pompe à membrane (tubulaire ou simple). La membrane sépare le fluide moteur en pression (huile) de la boue. Ainsi, les seules pièces d'usure au contact de la boue sont les clapets et leurs sièges,

- pompe à deux cylindres (utilisée pour le transport des pâtes et du béton, mais également pour les boues moins denses),
- pompe à roue hélicoïdale (utilisée pour les pâtes fines dans l'industrie chimique).

1.1.3. Transport gravitaire à surface libre

Le transport gravitaire des boues convient lorsque la dénivellation est suffisante pour vaincre le frottement des boues sur les parois. Pratiquement, le dispositif de transport peut être un canal sur appuis (éventuellement amovible) ou une conduite à écoulement à surface libre.

Comme dans le cas des conduites en charge, le choix des dimensions du dispositif et de sa pente relève d'une étude spéciale. En effet, le choix du parti permettant d'éviter à la fois le risque de sédimentation (vitesse d'écoulement trop faible) et l'usure excessive (vitesse trop importante) exige la détermination des caractéristiques de la boue en laboratoire (sédimentation, viscosité, etc.).

Il est nécessaire de prendre des mesures pour assurer la protection du personnel vis-à-vis des risques liés aux écoulements de boues à vitesse élevée.

Une sélection de documents traitant du transport à surface libre est donnée au Chapitre 4.

1.2. TRANSPORT PAR VOIE SÈCHE

Dans de rares cas, les stériles produits par l'usine sont à l'état « sec », c'est-à-dire, ne se présentent pas comme des boues ou des liquides. En réalité, ces stériles « secs » produits par certains procédés (tapis transporteur, presses filtrantes, etc.) sont loin d'être vraiment secs, leur teneur en eau n'étant généralement guère inférieure à 25 %. Dans ces conditions, « matériaux secs » signifie « assez secs pour être repris par des engins de terrassement ».

Most importantly, the pump performance and efficiency must be up-rated to account for losses due to particle size and slurry concentration effects, and the drive motor sizing must always allow for the slurry specific gravity.

A centrifugal pump is the ideal slurry pump for short distances, high volume applications and can give many years of reliable service if correctly selected and sized.

Positive displacement pumps come in various forms, namely

- The plunger type pumps. Generally used for fine abrasive slurries at high pressure.
- The piston type pump. Typically used for fine slurries at high pressure.
- The diaphragm type pump. (Tube diaphragm or plain diaphragm). The diaphragm provides a barrier between the motive pressurizing fluid (oil) and the slurry. The valves and seats are therefore the only wear parts in contact with the slurry.
- The two-cylinder piston type pump. Typically used for pumping pastes and concrete, but can also be used for less dense slurries.
- Helical rotor type pump. Used for fine pastes in the chemical industries.

1.1.3. Transport by open gravity flume

Gravity transportation of slurries can be used in cases where sufficient gravity head is available to overcome the friction losses generated by the slurry in the flume. The flume can take the form of a partially full pipe or an open launder.

As in the case of pipeline transport of slurries the selection of flume size and gradient is a specialised subject. Size and gradient selection to prevent either deposition of solids in the flume due to low transport velocity or excessive wear due to high velocities, requires careful laboratory testing of the slurry to determine its settling characteristics, viscosity and other flow properties.

Precautionary measures for protection and safety of personnel against injury from fast flowing slurries, are needed.

Selected references on flume design for slurry transportation are given in Section 4 of this document.

1.2. DRY TAILINGS

There are instances, although these are in the minority, where the tailings waste product generated at the plant source is “dry”, as opposed to being in slurry or liquid form. “Dry” tailings produced from belt or filter presses or the like are not really dry at all, having moisture contents generally not much less than 25%. Therefore “dry” only means “dry enough to handle mechanically”.

Parfois, on rajoute de l'eau pour en faire une boue pour les besoins du transport. Dans le cas contraire, le transport et la mise en place des matériaux « secs » sur le dépôt se font :

- par camion à benne basculante,
- par tapis transporteur avec, pour la mise en place sur le dépôt, tapis secondaires, épandeurs, etc.

De nombreux paramètres sont à prendre en compte dans le cas du transport par voie sèche. Il est essentiel d'étudier les conditions de fonctionnement et de bien choisir des équipements adaptés et performants.

Le Bulletin 45 présente une étude plus complète des méthodes de mise en place et de la protection de l'environnement dans le cas du transport des stériles par voie sèche.

In these cases if reslurrying for hydraulic transport is not used, transportation and disposal of the “dry” product at the waste disposal site can be by

- road transportation and tipping on to a dry dump
- conveyor belt transportation and placing on to the dry dump by lateral conveyors, flingers, spreaders or similar equipment.

Factors relating to transportation of “dry” tailings are many and varied. Careful study of the operational requirements and of the selection of appropriate and cost effective is essential.

ICOLD Bulletin 45 deals more fully with the disposal techniques and environmental considerations associated with the disposal of “dry” tailings.

2. MISE EN PLACE DES STÉRILES

Lorsque les stériles arrivent sur le dépôt sous forme de boue, il faut séparer l'eau des éléments solides pour permettre leur utilisation comme matériau de construction du barrage de stockage des stériles.

Cette séparation et la mise en place des matériaux sont obtenues par diverses méthodes, à savoir (voir les chapitres 3.3.4 et 4.2.2 du Bulletin 45) :

- cyclonage,
- déversement par une série de buses (spigots),
- réseau d'enclos (cuvettes) de décantation (méthode cellulaire),
- engins de terrassement,
- remblais de terre ou d'enrochement,
- méthode centrale.

Chaque technique correspond à des critères de fonctionnement spécifiques, présentés ci-dessous.

Il faut noter que, quelle que soit la méthode de réalisation adoptée, lorsque la digue amont comporte, dans son profil, des matériaux fins, partiellement ou totalement saturés, la stabilité du barrage ne sera assurée que si la pente du talus aval reste toujours conforme au projet, calculée sur la base de la résistance du matériau saturé, consolidé, non drainé (ou une résistance effective, tenant compte des sous-pressions induites). Pour cette raison, la méthode de mise en place doit assurer la conformité du talus aval avec le projet.

2.1. MISE EN PLACE PAR CYCLONE

Le chapitre 4.2.2 du Bulletin 45 décrit la méthode de mise en dépôt par cyclonage (terminologie, méthodes, paramètres). On présente ici des recommandations plus détaillées concernant la mise en place par cette méthode.

2.1.1. Limites d'application de la méthode

Les conditions d'application du cyclonage à la séparation des stériles en deux composantes : fraction grossière, autostable, auto-drainante, pour le barrage pro-

2. TAILINGS PLACEMENT

In the case of tailings arriving at the disposal site in slurry form, the solids require to be separated from the water if they are to be utilised for the self-building of the tailings impoundment.

This separation and placement can be achieved in a number of ways as described in Chapters 3.3.4 and 4.2.2 of the ICOLD Bulletin 45, namely

- Cyclone deposition
- Spigot discharge
- Paddock system (cell construction)
- Mechanical placing
- Earthfill or rockfill walls
- Central discharge.

Each of these disposal techniques can give rise to specific operational requirements and these can be generally identified as set out below.

It must be noted that common to all techniques of placement, any upstream embankment containing partially or fully saturated, fine grained materials within the embankment slope, stability of the tailings impoundment can only be assured by holding the outer face to a design slope calculated using the consolidated, undrained strength of the saturated materials (or alternatively effective strength parameters with allowance for generated pore pressures). Tailings placement techniques must facilitate the control of the outer slope of the impoundment to within design limits.

2.1. CYCLONE DEPOSITION

Section 4.2.2 of ICOLD Bulletin 45 defines the various terms, methods and parameters applying to cyclone deposition. More detailed guidelines on placement follow hereunder.

2.1.1. Limits of applicability of cyclone deposition methods

The applicability of cyclones for the separation of tailings into a coarse, freestanding, free draining material to form the outer tailings dam

prement dit, et fraction fine, à fort degré de saturation, à stocker derrière ce remblai, sont les suivantes :

- (i) Le débit de fond sera suffisant pour assurer la montée du barrage de stockage en avance sur la montée des fines à stocker (point de séparation adapté). Il faut tenir compte également de la topographie du site.

Les facteurs affectant le développement du barrage de stockage sont :

- a) la topographie de la vallée, pour la montée du barrage par rapport au niveau de stockage des éléments fins;
- b) la configuration du cyclone : pression d'alimentation, vortex, dimension de l'extrémité de sortie, angle d'ouverture du cône;
- c) variation de la concentration de la boue entrant dans le cyclone, et de la granulométrie;
- d) angle de talus stable des stériles grossiers mis en dépôt;
- e) configuration du barrage constitué de stériles grossiers (méthodes de construction : amont, aval, axe central).

L'optimisation de ces facteurs sera nécessaire avant le choix définitif du dispositif d'exécution.

- (ii) La pression dans la conduite d'alimentation du cyclone sera suffisante pour le bon fonctionnement de celui-ci.
- (iii) La modulation de la pression dans la conduite d'alimentation sera possible. Cette pression doit rester dans les limites prescrites pour assurer le bon fonctionnement du cyclone.
- (iv) La granulométrie des stériles correspondra aux forces centrifuges en jeu afin d'assurer la séparation nécessaire entre fractions grossière et fine. Une granulométrie uniforme ou quasi uniforme ne convient généralement pas à la construction d'un barrage par cyclonage, mais, dans ce cas, le cyclone peut néanmoins servir à essorer les matériaux et favoriser ainsi « l'auto-construction » du remblai.
- (v) La concentration en éléments solides sera assez faible (la quantité relative d'eau sera assez grande) pour permettre la séparation des fractions grossière et fine sans trop d'interférences. Des concentrations supérieures à 50 % (en poids) se sont avérées peu adaptées au cyclonage.
- (vi) Les caractéristiques du débit de fond seront conformes aux spécifications de projet du barrage;
 - teneur en eau optimale pour assurer la montée automatique du barrage sans travaux complémentaires,
 - matériau en place relativement perméable et auto-drainant,
 - résistance au cisaillement drainée, consolidée, du matériau en place, adaptée aux conditions de stabilité requises.

impoundment and a fine, wet fraction for storage behind this impoundment is as follows :

- (i) The proportion of material reporting to the cyclone underflow (cyclone split) must be sufficient in order to keep the rate of growth of the outer impounding dam ahead of the rate of filling of the fines. The dam and fines growth rates are dependent upon the topography of the tailings dam site.

Factors affecting the development of the impounding dam are :

- a) Topography of the valley for growth of the dam in relation to filling rate of fines.
- b) Cyclone configuration, i.e. feed pressure, vortex finder and apex size, cone angle.
- c) Variation of feed slurry concentration and particle size distribution.
- d) Safe slope angle of deposited coarse tailings.
- e) Configuration of coarse dam (upstream, centreline, downstream).

Design optimisation of the above factors will be necessary before final selection of a working system.

- (ii) Sufficient pressure must be available in the slurry feed pipe for operation of the cyclones.
- (iii) Similarly, control of the pipeline pressure must be possible. The pipeline pressure should be held within a defined range of limits to ensure consistent cyclone separation.
- (iv) The tailings grading must be such that it will respond to the centrifugal forces acting within a cyclone in achieving a split of the material between coarse and fine fraction. A single sized or near-single sized material is not generally suitable for cyclone separation dam building techniques, although in these cases the cyclone can be used as a dewatering device to facilitate “ self building ” of the placed material.
- (v) The feed slurry concentration should be low (wet) enough to allow effective centrifugal separation of coarse and fine particles without excessive interference. Concentrations in excess of 50 % by mass have been found to yield poor cycloning results.
- (vi) The properties of the cyclone underflow must be such as to meet the design requirements of the outer impoundment, i.e.
 - the underflow material must have an optimised moisture concentration in order that it will form itself into a self-building heap that will constitute the dam, without further working, and
 - it must be relatively permeable and free draining,
 - its drained, consolidated effective shear strength must be adequate for the configuration of the impoundment.

Le choix du cyclone est basé sur des essais en vraie grandeur, ou confié à un spécialiste (ingénieur-conseil, fabricant), car il dépend de l'interaction d'un grand nombre de paramètres complexes tels que :

- pression d'alimentation
- configuration et dimensions de l'entrée du cyclone
- angle d'ouverture du cône
- dimensions du cyclone
- diamètre et longueur du vortex
- diamètre du sommet ou de la sortie.

2.1.2. Méthodes de mise en place par cyclone

Il existe deux méthodes principales d'exploitation des cyclones pour la réalisation d'un barrage de stériles :

a) *Station centrale de cyclonage*. Les stériles sont triés dans une station de cyclonage implantée près de la zone du barrage consommant la plus grande partie des matériaux grossiers (pour réduire la distance de transport). Ces matériaux sont acheminés vers le barrage par pompage, pour un cyclonage supplémentaire ou un déversement par buses. Ce matériau est parfois réglé et compacté par engins, en particulier dans les régions de forte séismicité, l'augmentation de la densité *in situ* réduisant le risque de liquéfaction.

La station alimente les différents chantiers à tout moment selon les besoins. De cette façon, on peut s'assurer que le barrage constitué d'éléments grossiers présentera une revanche convenable (1,5 à 2,0 m) avant tout déversement de fines côté amont.

Le seul point délicat concerne le pompage du débit de fond relativement sec. Pour résoudre ce problème, on rajoute souvent de l'eau, ce qui facilite, le cas échéant, le cyclonage secondaire sur la crête du barrage.

On utilisera de préférence tous les stériles grossiers (débit de fond) pour la construction du barrage. Si ce débit est supérieur aux besoins, on arrêtera les cyclones de temps en temps (pendant la nuit, par exemple), ce qui réduira les charges de surveillance et de fonctionnement.

Dans ce cas, la totalité de la production de stériles est acheminée vers le barrage pendant la nuit. Le matériau plus grossier ainsi déversé sur la plage peut favoriser la consolidation de celle-ci.

b) *Cyclonage local*. Le débit total de stériles est acheminé vers le barrage, où il est trié par des cyclones situés le long de la crête. Il faut une surveillance constante pour s'assurer de la bonne répartition des débits de fond et en suspension. Les cyclones sont déplacés régulièrement, éventuellement à la fin de chaque poste de travail.

En cas de chute de la pression d'alimentation, le débit de fond peut devenir impropre à la réalisation du barrage, voire s'interrompre. Il faut donc prévoir un moyen de secours dirigeant l'ensemble du débit de stériles vers le milieu de la retenue. C'est là un point critique de cette méthode de mise en dépôt, puisqu'en

Selection of a cyclone for the required duty should be determined either by full scale performance testing or left to an experienced designer and/or commercial supplier, as there are many complex and interrelated factors that will affect performance, such as :

- cyclone feed pressure
- cyclone inlet configuration and size
- cyclone cone angle
- cyclone size
- Vortex finder diameter and length
- Apex/spigot diameter.

2.1.2. Methods of placement with cyclones

There are essentially two modes of cyclone operation for tailings dam depositing, namely :

a) *Central cyclone station* The tailings are processed at a central cyclone bank nearest to that dam requiring most of the coarse material (optimising further transport). The coarse underflow material is pumped to the dam for either secondary cycloning or spigot deposition. Mechanical equipment is sometimes used to shape and compact the deposited material, especially in high earthquake potential regions where increased in situ density of the tailings will reduce liquefaction potential.

The operation of the impoundment is then such that the various products may be placed exactly where they are needed at any particular time. This makes it possible to raise the outer dam using coarse tailings to achieve a reasonable freeboard of about 1,5 to 2,0 m well before depositing any fines behind this dam.

With this method of deposition the only problem lies in the practicability of pumping the relatively dry underflow slurry, and this is often achieved by addition of water before pumping. This will also facilitate second stage cycloning on the dam crest if this is to be applied.

It is preferable to utilize all of the coarse tailings (underflow) for dam building. If the cyclones do produce an excess of underflow material, it is then possible to shut them off for a while, e.g. at night, thus reducing supervision and operating costs.

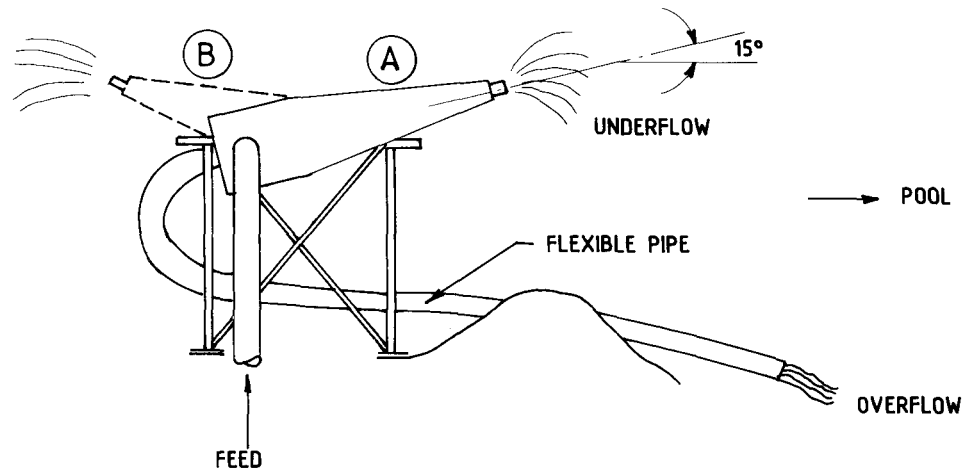
In this situation, arrangements must be made for discharging the entire tailings quantity on to the tailings dam during the night hours. This relatively coarse discharge on to the beach can assist in overall consolidation of the beach.

b) *On-dam cyclones* The total tailings feed is transported to the dam where it is separated by means of cyclones positioned along the crest. This method of operation requires constant supervision to ensure that the under- and overflows are placed correctly. The cyclones have to be moved at regular intervals, possibly at the end of each working shift.

Should the feed pressure drop from its normal operating pressure, the quality of the underflow may either deteriorate to such an extent as to render it unsuitable for dam building purposes or cease altogether. Therefore, provision must be made for emergency deposition into the middle of the impoundment. This is particularly

cas de fortes pluies la revanche risque d'être compromise de manière inacceptable. Une fois de plus, cette constatation souligne la nécessité d'avoir un personnel d'encadrement qualifié.

La distance séparant les zones de dépôt des débits de fond et des débits en suspension est limitée à 10 m environ. Le débit en suspension est envoyé dans un tuyau flexible, le débit de fond sortant directement par le sommet du cyclone pour constituer le barrage devant celui-ci (voir Fig. 4). L'avantage principal de cette méthode de construction du barrage est d'éviter toute reprise des matériaux fins ou grossiers. Notons que le montage du cyclone représenté sur la Fig. 4 n'est pas le seul possible; il peut être adapté aux besoins spécifiques des travaux.



Nous avons vu que tout excédent de matériau grossier produit par les cyclones au-delà des besoins des travaux de construction du barrage amène une réduction du nombre de postes de fonctionnement des cyclones. Dans le cas inverse, si le débit en éléments grossiers est insuffisant, le réglage des cyclones est à revoir, afin d'obtenir le fractionnement voulu.

c) Méthode « cellulaire » de mise en dépôt (voir aussi 2.3.4).

Cette méthode est décrite en détail dans la référence [4] (Lighthall *et al.*) et correspond au cas où les sables du débit de fond du cyclone sont mis en dépôt dans des « cellules » ou enclos (cuvettes) pour un compactage mécanique ultérieur. Cette méthode améliore la stabilité du matériau mis en dépôt et réduit le risque de liquéfaction en cas de séisme.

2.1.3. Difficultés susceptibles d'être rencontrées

Les difficultés énumérées ci-dessous peuvent survenir lors des travaux de cyclonage. Chaque problème, avec ses mesures correctives, est identifié.

critical in this method of deposition since the freeboard available for stormwater retention may deteriorate to unacceptable levels under these circumstances. These facts again highlight the importance of having suitably qualified supervisory staff.

The furthest distance that the overflow may be deposited from the underflow (and the cyclone) is of the order of 10 metres. This is achieved by attaching a flexible hose to the overflow and allowing the underflow to discharge unimpeded to form the retaining pile of coarse dam material ahead of the cyclone, as shown in Fig. 4. The obvious advantage of this system of deposition and dam building is that no rehandling of either the coarse or fine material is required. It must be noted that the actual method of mounting the cyclone need not necessarily be as illustrated in Fig. 4, but can be arranged to suit the particular project requirements.

Fig. 4

On-dam cyclone
Cyclone local

A Upstreaming construction	<i>A Construction par la méthode amont</i>
B Centrelining or downstreaming construction	<i>B Construction par la méthode aval ou de l'axe central</i>
Feed	<i>Arrivée des boues</i>
Underflow	<i>Débit de fond</i>
Flexible pipe	<i>Tuyau flexible</i>
Overflow	<i>Débit en suspension</i>
Pool	<i>Retenue</i>

Mention was previously made that if the cyclones produced coarse tailings in excess of the requirements for dam building, the shifts during which the cyclones are operated may be reduced. If the converse were to happen, however, i.e. the production of coarse tailings were insufficient, adjustments would have to be made to the cyclones to achieve the required split.

c) *Cell or hydraulic cell deposition* (see also 2.3.4)

This method is described fully in reference 4) Lighthall et al, and covers the case where cyclone underflow sands are deposited in cells or paddocks, for subsequent mechanical compaction. This procedure enhances the stability of the deposited material and reduces its liquefaction potential in the event of seismic activity.

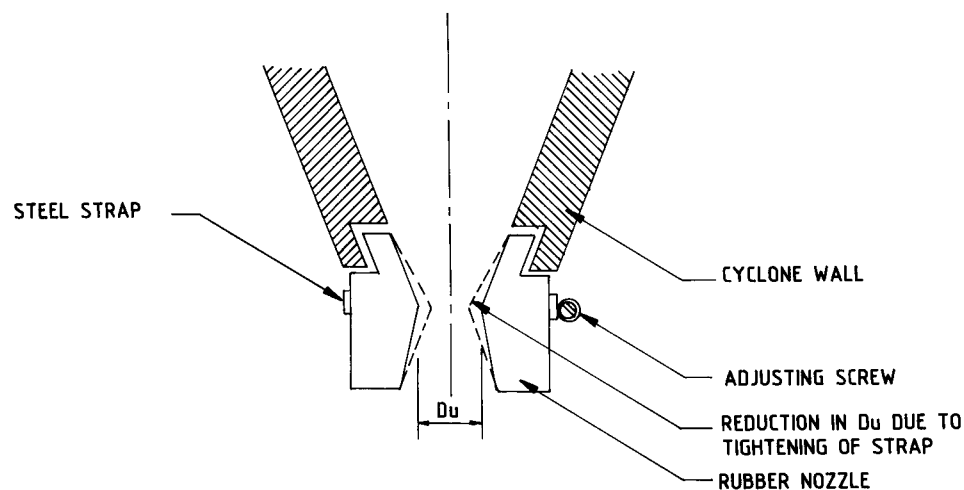
2.1.3. Cyclone deposition difficulties

The following common deposition difficulties can arise during cyclone deposition sequences. The problem and its associated correction action is identified.

a) *Le débit de fond* sort sous forme d'un jet compact au lieu de se disperser en pluie. La cause en est, soit un diamètre de sortie trop petit, soit une pression d'alimentation trop faible. Dans ce cas, les caractéristiques de la fraction grossière risquent d'être insuffisantes. Si le débit sous forme de jet est inacceptable, on vérifie le diamètre de sortie, et on augmente la pression d'alimentation en arrêtant un certain nombre de cyclones ou en ouvrant une vanne by-pass pour diriger la boue excédentaire directement dans la retenue.

(Nota : Le débit sous forme de jet est parfois voulu et est alors une spécification de fonctionnement).

Il est à noter que le bec de sortie du débit de fond de la plupart des cyclones industriels est équipé d'un ajutage amovible en caoutchouc. Celui-ci permet le réglage fin du diamètre de sortie, au moyen d'un collier que l'on serre ou desserre selon le cas (voir Fig. 5). On peut ainsi opérer tous les réglages nécessaires au bon fonctionnement du cyclone sans débrancher l'alimentation.



b) *Le point de fractionnement* ne correspond pas au débit de fond nécessaire ou aux caractéristiques requises pour la fraction grossière. La cause peut être l'usure des organes du cyclone, ou une pression d'alimentation incorrecte. De même, une variation de la granulométrie des stériles produits par l'exploitation peut modifier l'action du cyclone et déplacer le point de fractionnement.

c) *Le rythme de mise en dépôt des éléments grossiers* est trop rapide, le remblai restant saturé, sans consolidation, et ses caractéristiques globales n'assurant pas la stabilité compte tenu des fortes pressions interstitielles. Le rythme de montée du remblai risque d'être excessif lorsque le cyclone est resté trop longtemps au même emplacement, ou lorsque le débit d'alimentation est trop important par rapport au relief du terrain et aux dimensions du barrage. Dans ces cas, le drainage de l'eau

(a) *The cyclone underflow discharge* may be a rope discharge instead of the designed “ spray ” discharge. This is caused by a restriction of the cyclone apex or by too low a feed pressure. The resulting property and split of the underflow may be inadequate in this type of operation. In the case of unscheduled “ rope ” discharge, the cyclone apex diameter should be checked and the feed pressure raised by reducing the number of operating cyclones or by opening a bypass valve to discharge excess slurry directly towards the supernatant pond.

(*Note* : In specific cases, a rope discharge may have been designed, and of course would then be an operating requirement.)

It should be noted that the underflow outlet or spigot of most commercial cyclones contain removable rubber nozzles of various diameters. Fine adjustment of the underflow outlet diameter can be made by loosening or tightening a strap around the nozzle as indicated on Fig. 5. In this way all the required adjustments to the efficient and proper operation of the cyclone can be made without having to disconnect it from the feed.

Fig. 5

Variation of the underflow diameter
Réglage du diamètre de l'ajutage (débit de fond)

Steel strap	<i>Collier en acier</i>
Cyclone wall	<i>Paroi du cyclone</i>
Adjusting screw	<i>Vis de réglage</i>
Reduction in Du due to tightening of strap	<i>Réduction du Du par serrage de la vis</i>
Rubber nozzle	<i>Ajutage en caoutchouc</i>

(b) *The cyclone's tonnage split* to the underflow may be inadequate or the material properties of the underflow may not match the design requirements. This type of difficulty may be caused by worn components in the cyclone or by incorrect feed pressure. Alternatively, a change of particle size distribution of the tailings slurry feed from the plant can cause a change in cyclone performance and split.

(c) *Cyclone underflow material may be deposited* so fast that it results in a deposit that is saturated and unconsolidated, and of insufficient total strength for stability to be maintained, due to trapped excess pore pressures. An excessive rate of rise of the deposited underflow material can arise when a cyclone has been left in one place too long, or alternatively, the rate of feed to the cyclones is too high for the ground profile configuration and size of dam. In these situations the water

n'a pas le temps de s'effectuer, d'où les conditions inacceptables décrites ci-dessus.

d) *La plage formée par le débit en suspension* monte trop vite, menaçant de submerger le barrage constitué par le débit de fond. Les causes possibles sont nombreuses : point de fractionnement incorrect dans le cyclone, erreur d'évaluation de la densité sèche des matériaux déposés, niveau trop élevé de la retenue qui gêne la formation de la plage, etc.

Les rythmes de montée du barrage et de la plage doivent être réglés avec soin dès les études de projet afin d'éviter ce problème. Dans la Fig. 6, on présente un exemple de courbes théoriques pour un barrage de stériles construit par cyclonage.

e) *Érosion du talus aval par les précipitations*. En général, les rigoles creusées par érosion sont facilement comblées par les matériaux grossiers déversés ultérieurement.

f) *Fissuration longitudinale du remblai constitué de matériaux de fond*. Elle est généralement due aux tassements et à la consolidation des matériaux mis en place antérieurement, notamment en cas de réalisation par la méthode amont (éléments grossiers reposant sur la plage d'éléments fins). Généralement, les fissures ne compromettent pas la stabilité du barrage, et il suffit d'y diriger le débit de fond pour les remplir et empêcher ainsi les eaux de pluie d'y entrer.

g) *Une revanche suffisante* entre le niveau de la retenue et le bord supérieur de la plage doit être maintenue en permanence, afin de ménager une tranche de stockage des eaux de pluie. Le niveau de la retenue ne doit jamais venir en contact avec le remblai de matériaux grossiers. Si une telle situation se présente, on doit immédiatement faire marcher le cyclone pour rehausser le niveau de la plage et assurer ainsi une revanche suffisante.

h) *En cas d'essais préalables* pour guider le choix du cyclone (rendement, dimensionnement), il ne faut pas oublier que le recyclage de l'échantillon de boue risque de fausser les résultats, par suite de modification de la granulométrie. Des essais en vraie grandeur ne sont pas toujours possibles, compte tenu des quantités en jeu, ou par manque de stériles nécessaires à l'essai lorsque les études précèdent la mise en service des installations d'extraction et de traitement des minerais.

En résumé, la liste des contrôles à effectuer régulièrement est la suivante :

- (i) Contrôle de l'usure des organes des cyclones.
- (ii) Contrôle permanent de la pression d'alimentation des cyclones, et réglages éventuels.
- (iii) Contrôle régulier des caractéristiques des matériaux grossiers (débit de fond) et du point de fractionnement entre débit de fond et débit en suspension.
- (iv) Remplissage des fissures et des rigoles d'érosion.
- (v) Maintien d'une revanche suffisante entre le bord supérieur de la plage et le niveau de la retenue.

has insufficient time to drain away, leading to the unsatisfactory conditions described above.

(d) *The stored overflow beach* may be rising so fast that it threatens to overtop the outer cyclone underflow dam. This could be caused by a number of factors such as cyclone split, incorrect assumptions of deposited dry densities of the material, by maintaining too high a water pond which restricts the beach growth, etc.

Careful design planning of the rates of rise of the outer coarse dam and the stored fines beach must be undertaken to ensure that this will not happen. Typical design stage curves for a cycloned tailings dam are presented in Fig. 6.

(e) *Stormwater erosion of the outer face of the cyclone impoundment.* Generally erosion channels can easily be filled with fresh cyclone underflow material.

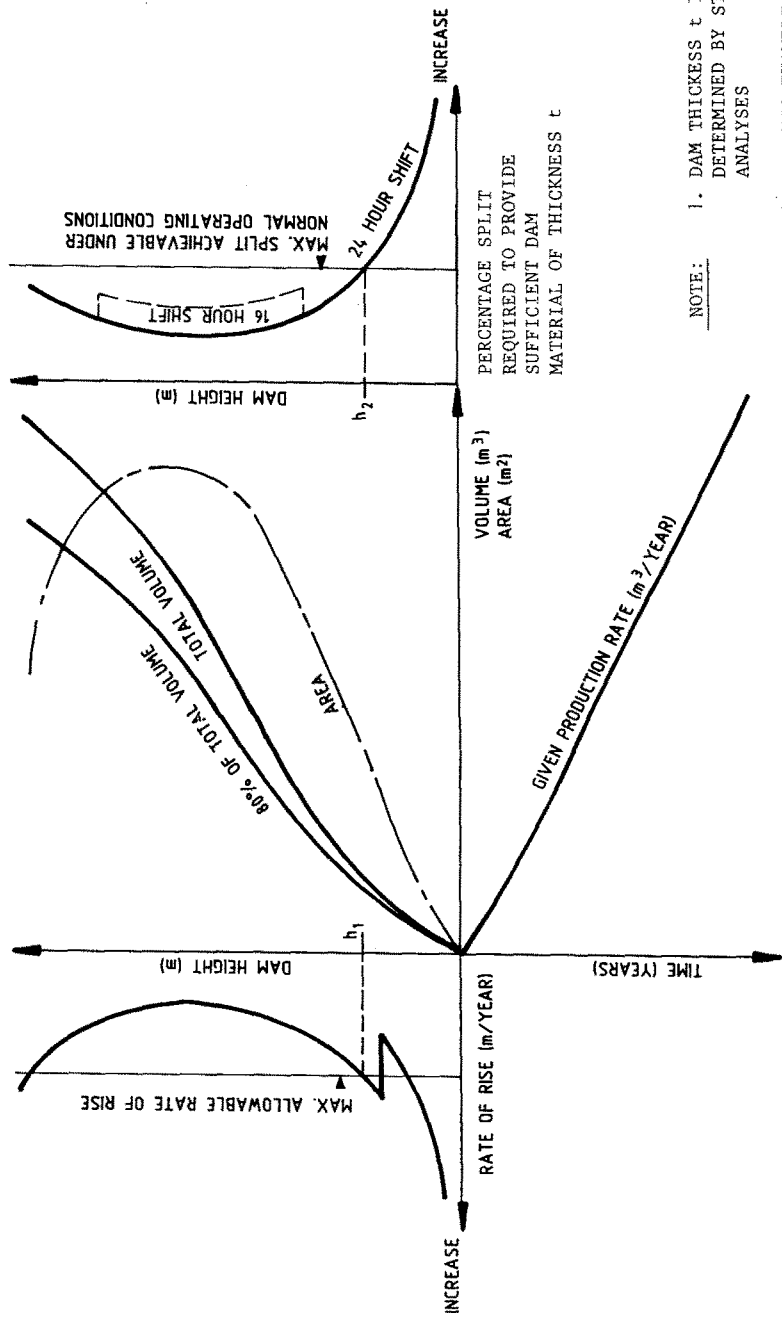
(f) *Longitudinal cracks appearing in the cyclone underflow deposition material.* These cracks are generally due to settlement and consolidation of underlying material, particularly in an upstream deposition sequence where the coarse material is being placed on top of the underlying fines beach. Generally, these cracks are not detrimental to the strength of the tailings dam and should merely be filled with fresh cyclone underflow material to prevent excessive ingress of stormwater.

(g) *An adequate freeboard* between the supernatant pond and the head of the beach should always be maintained, in order to allow for stormwater ingress to the pond. The pond should not be allowed to come into contact with the coarse deposit. In cases where this is happening, cycloning and beach building in the affected zone should be undertaken to develop the necessary freeboard.

(h) *If cyclone tests* are undertaken to determine performance and component sizing before selection for duty, care must be taken in using re-circulated tailings slurry samples as particle degradation will affect results. However, full scale testing is not always possible due to quantities involved and because material is not always available before mining and associated flotation or ore dressing commences.

To summarise, the following items of check maintenance should be regularly carried out :

- (i) Cyclone components should be checked for wear.
- (ii) Cyclone feed pressures should be constantly monitored and maintained at the specified values.
- (iii) Regular checks should be taken of the cyclone underflow properties and of the cyclone split to the underflow.
- (iv) Regular maintenance of cracks and erosion channels should be undertaken.
- (v) Adequate beach freeboard should always be maintained.



NOTE:

1. DAM THICKNESS t IS DETERMINED BY STABILITY ANALYSES

2. IN THIS EXAMPLE $h_1 > h_2$
 •• RATE OF RISE (h_1) CONTROLS THE REQUIRED HEIGHT OF STARTER DAM (EQUAL TO h_1)

Fig. 6

Typical stage curves for a cycloned tailings dam
Barrage de stériles construit par cyclonage. Exemples de courbes de hauteur

Increase
 Rate of rise (m/year)
 Volume (m³)
 Area (m²)
 Max. allowable rate of rise
 Dam height (m)
 80 % of total volume
 Total volume
 Area
 Percentage split required to provide sufficient
 dam material of thickness t
 16 hour shift
 24 hour shift
 Max. split achievable under normal operating
 conditions
 Given production rate (m³/year)
 Time (years)

Note :

1. Dam thickness t is determined by stability analyses.
2. In this example, $h_1 > h_2$; therefore rate of rise (h_1) controls the required height of stater dam (equal to h_1).

Sens de l'accroissement
 Rythme de montée (m/an)
 Volume (m³)
 Surface (m²)
 Rythme max. de montée admissible
 Hauteur du barrage (m)
 80 % du volume total
 Volume total
 Surface
 Fractionnement relatif pour obtenir suffisamment
 de matériau de barrage d'épaisseur t
 Poste de travail de 16 heures
 Poste de travail de 24 heures
 Fractionnement max. possible en conditions nor-
 males de fonctionnement
 Rythme de production (m³/an)
 Temps (années)

Note :

1. L'épaisseur de barrage t est déterminée par les calculs de stabilité.
2. Dans cet exemple, $h_1 > h_2$; le rythme de montée détermine donc la hauteur du remblai d'amorce (égale à h_1).

On trouvera une liste de références, au chapitre 4 et dans la Bibliographie des Barrages de Stériles publiée par la CIGB.

2.2. MISE EN PLACE PAR DÉVERSEMENT AU MOYEN DE BUSES (SPI-GOTS)

Le chapitre 4.2.3 du Bulletin 45 décrit cette méthode. Les commentaires ci-dessous concernent certains détails relatifs à ces installations.

2.2.1. Conditions d'application de la méthode

Cette méthode est généralement bien adaptée aux boues présentant une granulométrie très étalée d'éléments relativement grossiers et drainants, et aux climats secs. Une forte teneur en eau (concentration faible) favorise le tri des matériaux sur la plage et améliore la stabilité du dépôt.

Contrairement au cyclonage, cette méthode par déversement ne convient en principe qu'à la méthode amont de construction. Elle vise essentiellement à obtenir un tri progressif des stériles, les éléments les plus grossiers se déposant près du barrage, ce qui conduit à une plage stable et drainante. Ainsi, le dépôt avec sa retenue monte automatiquement.

Il existe deux possibilités :

a) les stériles sont déversés contre un barrage pré-existant en terre ou en enrochement, pour créer une plage interne stable,

b) le barrage lui-même est créé directement par les stériles mis en dépôt. Dans ce cas, il faut prévoir un moyen de réaliser, à l'aide des stériles, des remblais d'amorce sur le pourtour de l'emprise.

2.2.2. Dimensionnement des buses de déversement

Le dispositif consiste en une série de buses de sortie disposées le long de la canalisation de transport des boues ceinturant la retenue. Les stériles sont déversés sur la plus grande surface possible pour réduire leur vitesse lorsqu'ils s'écoulent sur la plage vers la retenue. De cette façon, les éléments grossiers se déposent non loin du point de déversement, tandis que les éléments plus fins sont transportés plus loin sur la plage.

Le choix du diamètre et de l'entre-axe des buses est généralement fait de façon empirique, compte tenu des besoins de l'exploitation.

Normalement, la conduite de transport ceinture la retenue, les buses étant disposées tous les 6 à 20 m au droit des zones de dépôt. L'écartement des buses est suffisamment réduit pour éviter la création de monticules, derrière lesquels les éléments fins seraient piégés.

Le débit est généralement fractionné entre quatre à dix buses, les autres étant fermées par vanne ou bride.

Selected references are given in Section 4 and in the ICOLD Bibliography on Tailings Dams.

2.2. SPIGOT DISCHARGE DAM BUILDING TECHNIQUE

Section 4.2.3 of ICOLD Bulletin 45 defines the general method of tailings deposition by spigot discharge. Detailed comment on spigotting systems follows :

2.2.1. Review of spigotting applicability

Spigot deposition is generally suitable for slurries with a wide range of particle sizes, and a relatively coarse, free draining tailings operated in a dry climate. High water content (low concentration) slurries achieve a better classification of the material on the beach resulting in a more stable deposit.

The spigot dam building technique, unlike the cyclone technique, is generally applicable only to upstream construction. The spigot method is essentially aimed at classifying the deposited tailings to yield a high proportion of coarse particles at the perimeter dam thereby achieving a stable, well drained beach and allowing self building of the tailings impoundment.

Spigotting can be used either

a) for discharge of tailings from a pre-formed earth or rock impounding dam to form a stable internal beach, or

b) to achieve an outer dam using the deposited tailings. In this case some means of forming shallow starter dams on the extreme perimeter with the tailings will be required.

2.2.2. Spigot design

Spigots are multiple outlets in the slurry feed main located around the perimeter of the impoundment, intended to discharge the tailings stream over as large a beach area as practically feasible, so as to produce low velocity slurry flow down the beach toward the pond. This causes the coarse particles to settle out close to the spigot point and the finer particles to settle out further down the beach and away from the perimeter dam.

The selection of spigot diameter and spacing is generally a matter of practical application and operational control.

The slurry delivery pipe is conventionally located around the entire perimeter of the impoundment, with spigot off takes located at intervals ranging from 6 to 20 m along the zones where deposition is required. The spigot intervals must be close enough to ensure that tailings fines are not trapped against the outer berm between spigot mounds.

The tailings slurry stream is then generally split into between four and ten operating spigots, with the remaining spigot off takes closed off by valve or blank flange.

Pour le choix du diamètre des buses, on cherche à obtenir une vitesse de sortie égale ou supérieure à celle de la canalisation principale d'alimentation, pour un nombre prédéterminé de buses ouvertes. Ce diamètre est généralement compris entre 1/5 et 1/20 du diamètre de la canalisation.

La vitesse de l'écoulement dans la canalisation diminue progressivement à l'aval de chaque buse ouverte. Cependant, il est inutile de réduire le diamètre de la canalisation, puisqu'il se produit une sédimentation partielle réduisant la section d'écoulement de façon automatique.

2.2.3. Principes de la méthode

Le déversement par buses convient surtout à la méthode amont de construction, la plage créant elle-même le barrage. Néanmoins, il est également adapté aux méthodes aval et de l'axe central, lorsque la plage sert à d'autres fins.

Le but principal de tout dépôt de stériles est la création, au moindre coût, d'un barrage périmétral dont la stabilité est assurée pendant toute la vie de l'ouvrage et qui facilite l'écoulement de l'eau vers l'aval. Le tri effectué par ce procédé de déversement répond à ce but de la façon suivante.

Les éléments grossiers se déposant près du barrage périmétral, il en résulte une zone à forte perméabilité. La surface de saturation est ainsi située à un niveau notablement plus bas que dans le cas d'une perméabilité uniforme. Les éléments grossiers sont très souvent plus durs, plus anguleux et moins argileux que les éléments fins; pour cette raison, la zone périmétrale du dépôt est formée de matériaux présentant un angle de frottement interne plus élevé. La pente de la plage est donc plus abrupte, favorisant l'écoulement de l'eau vers la retenue.

Il est donc évident que cette méthode de déversement convient seulement pour les stériles relativement grossiers (une très grande teneur en éléments fins associée à des éléments grossiers n'est cependant pas nécessairement préjudiciable). L'alimentation en stériles doit répondre à cette condition à tout moment.

Dans les régions arides, l'important taux d'évaporation observé sur la plage fait que le déversement par buses peut s'accommoder de stériles à granulométrie fine.

Dans les régions pluvieuses, cette méthode de déversement exige certaines précautions (rythme réduit de montée du dépôt, couches minces, déplacement fréquent des zones de dépôt).

Dans les deux cas, il importe de s'assurer que la saturation de la couche mise en dépôt a été réduite à une valeur bien inférieure à 100 % avant la mise en place de la couche suivante de stériles, ce qui évite le risque de développement de pressions interstitielles.

Dans les régions aux hivers longs et rigoureux, on peut rencontrer des problèmes dus à la formation de nappes de glace. Ils sont résolus, soit en faisant

The diameter of the spigot should be selected to achieve a discharge velocity that is the same or higher than that in the delivery main, with the calculated number of spigots in simultaneous operation. The spigot diameter is generally in the range of 1/5 to 1/20 of the diameter of the delivery main.

The velocity in the delivery pipe will decrease after each spigot off take. It is not necessary to vary the diameter of the delivery pipe in any way as partial sanding will occur to achieve a self regulation of internal flow area.

2.2.3. Spigotting fundamentals

Spigotting is essentially an upstream deposition technique with the beach itself constituting the dam. Spigotting can be applied in centreline or downstream deposition where the spigotted beach performs other roles.

The fundamental requirements of tailings disposal are to create a stable outer dam over the life of the impoundment, to do so at minimal cost and to encourage water to flow away from the sides of the impoundment. The classification process resulting from spigotted deposition combined with consolidation enhanced by seepage, and evaporation, achieves the requirements by the following processes.

Coarse particles deposited near the perimeter dam results in an increased permeability in this zone. The effect of this is a phreatic surface which is substantially lower than in the case of uniform permeability. Coarse particles are very often harder, more angular and contain less clay minerals than the finer particles, and material with a higher angle of internal friction is therefore deposited in the perimeter zones of the dam. Coarse particles deposited near the perimeter result in steeper beach slopes in the zone with a corresponding faster and more efficient runoff of water to the supernatant pond.

It is evident therefore that spigotting is suitable only for those tailings with a reasonable portion of relatively coarse particles in the slurry feed, although a very high proportion of very fine material, in conjunction with the coarse particles, is not necessarily detrimental. Successful operation of a spigotted tailings dam requires a feed which consistently meets this requirement.

Spigotting of fine tailings can be most successfully achieved in arid environments due to high rates of nett beach evaporation.

Spigotting can also be successfully achieved in wet climates providing low rates of rise, thin deposited layers and constant rotation of the deposition zone are applied.

In both cases it is essential to ensure that saturation of the deposited layer has reduced to much less than 100 % before placing the next layer of tailings, thereby avoiding the possibility of build up of trapped pore water pressures.

Spigotting can result in difficulties with trapped ice layers in areas with long cold winters. These difficulties can, however, be overcome by either open-end

débiter la canalisation principale à plein débit en hiver, soit en veillant à limiter l'épaisseur des couches déposées, au moyen d'un programme systématique d'ouverture des différentes buses.

Dans les deux derniers cas, il est absolument nécessaire d'étudier, lors du projet, le cas où les matériaux déposés restent saturés.

Pour assurer la stabilité des barrages périphériques, la surface de saturation doit être abaissée. L'action de tri décrite ci-dessus répond à cette contrainte, mais des drains filtrants ainsi que l'évaporation superficielle peuvent aussi jouer un grand rôle.

Dans la conception et l'exploitation d'un barrage construit par la méthode de déversement, les effets de l'évaporation doivent être évalués en premier lieu. Il convient d'évaluer la perte nette par évaporation en fonction de la montée du barrage et la rotation des zones de dépôt. Le projet du réseau de drains destiné à l'évacuation des percolations doit tenir compte de la partie piégée par capillarité.

La rotation des zones de dépôt (alternance de périodes de dépôt et d'assèchement) est très bénéfique pour la stabilité de l'ouvrage, que le climat soit sec ou pluvieux. Les périodes d'assèchement favorisent la dessiccation et la surconsolidation. Toutefois, dans les climats secs, on peut perdre une grande partie de l'eau de transport par évaporation (taux de récupération de 30 à 40 % seulement).

Une variante, dite « dépôt semi-aérien », applique les principes ci-dessus. Elle repose sur l'utilisation de rampes d'aspersion équipées d'un très grand nombre d'exutoires régulièrement espacés. Les cycles de fonctionnement et de repos sont rigoureusement réglés afin d'obtenir des couches d'épaisseur pré-déterminée, favorisant l'évaporation en période de repos. Ces cycles tirent le plus grand profit des effets bénéfiques de l'évaporation et de la consolidation des matériaux déposés. Par cette technique, la méthode de déversement devient applicable au cas des stériles fins.

2.2.4. Difficultés susceptibles d'être rencontrées

Des difficultés surviendront dans la mise en place par déversement au moyen de buses si les critères précités ne sont pas respectés. Ces difficultés sont les suivantes :

(i) *Absence de tri*

Causes possibles :

- granulométrie des stériles trop uniforme,
- vitesse excessive d'écoulement sur la plage, par suite du creusement de rigoles,
- écartement insuffisant des buses, créant des rigoles ou des ondulations,
- teneur en eau excessive dans la canalisation de transport.

Un remède possible consiste à augmenter le nombre et l'écartement des buses afin de réduire leur débit unitaire et la vitesse d'écoulement sur la plage, favorisant ainsi la sédimentation.

discharge during winter, or careful attention to the placement of thin layers of tailings on a strict rotational basis.

In the last two cases, care must be taken to ensure that the tailings impoundment design has covered the possibility that the deposited tailings remain saturated.

Stability of the perimeter dams requires that the phreatic line be depressed. This is partly achieved by the classification process outlined above. In addition, however, filter underdrains and surface evaporation can play a large part.

In the design and operation of a dam using spigotting, the effects of evaporation need to be assessed in the first instance. The nett evaporation loss must be evaluated in relation to the rate of rise of the dam, and the cycloning of deposition zone. Underdrains need to be provided to remove the excess seepage water fraction, after allowance is made for the water held in capillary suspensions.

Rotational deposition cycles, whereby deposition takes place for a limited time followed by drying periods, are particularly beneficial for stability in both wet and dry climates. The drying periods encourage dessication and over consolidation which enhances surfaces. Water recovery may not, however, be good in dry climates, with as little as 30 to 40 % of the process water being recovered.

A technique known as sub-aerial deposition makes formal use of the above principles, by incorporating spray bars with a very large number of evenly spaced discharge points. Deposition is done on a strictly rotational system with controlled thickness of deposited layers to allow beach drying between each cycle of deposition. These cycles maximise the beneficial effects of evaporation and consolidation of the deposit. This technique also allows the use of the spigot system with fine tailings.

2.2.4. Spigotting placement difficulties

Placement difficulties would arise if the above objectives are not met, and are described hereunder.

(i) Sorting of particles not achieved

This could be due to :

- a feed size grading which is too uniform;
- beach velocities being too high because of channelling;

- spigot spacings too close, causing channelling or uneven beaches;
- too high a water content in the feed.

The remedy may include increasing the number and spacing of the spigots in order to reduce individual spigot flows and to reduce the average flow velocity across the beach, thereby encouraging settlement of particles on to the beach.

(ii) *Ligne de saturation trop élevée*

Les causes possibles sont : rythme de mise en place trop rapide par rapport au taux d'évaporation, au débit des drains et au pouvoir drainant de la fondation; durée de mise en dépôt trop longue dans une seule zone. Il peut en résulter une ligne de saturation élevée avec résurgences sur le talus du barrage, provoquant une érosion des matériaux et un affouillement du talus constitué.

Dans ce cas, la zone de dépôt est déplacée afin de laisser reposer la zone défectueuse. On peut également écarter la retenue de cette zone en baissant le niveau de la retenue ou en élargissant la plage plus tard.

(iii) *Talus externe du barrage inaccessible au personnel et aux engins*

Cette situation peut résulter d'une plage de superficie trop faible ou d'un séchage superficiel insuffisant, généralement pour les mêmes raisons que celles indiquées en (ii) ci-dessus. D'autre part, les conditions climatiques peuvent ralentir le taux d'évaporation sur la plage.

Dans ces deux cas, le remède est celui présenté sous (ii) ci-dessus.

(iv) *Brèches*

Si la hauteur de revanche est insuffisante, il y a risque de fuite de boue ou d'eau. La parade est le rehaussement à temps du remblai du barrage. Le déversement par buses nécessite une forte mécanisation et une surveillance humaine permanente pour assurer la montée progressive du barrage au droit des buses ouvertes, et un effort de programmation pour le choix des zones futures de dépôt. On doit également prévoir la surélévation périodique de la canalisation de transport périmétrale.

Généralement, tous les problèmes ci-dessus sont aggravés en début d'exploitation, lorsque le rythme de montée des dépôts au-dessus du remblai d'amorce est rapide. Il faut être très vigilant à cette période, qui correspond généralement à l'emploi d'un personnel d'exploitation inexpérimenté.

2.3. MISE EN PLACE AU MOYEN D'UN RÉSEAU D'ENCLOS (CUVETTES)

La technique de réalisation au moyen d'enclos (cuvettes) est décrite au chapitre 4.2.4. du Bulletin 45. Les commentaires et les recommandations concernant cette technique sont présentés ci-dessous.

2.3.1. Généralités

Cette technique est utilisée dans les régions où le climat favorise un fort taux d'évaporation, pour les stériles fins à granulométrie quasi uniforme (qui ne conviennent ni au cyclonage ni au déversement par buses).

(ii) *Phreatic surface too high*

The overall rate of deposition on to the dam may be too high in relation to evaporation, the capacity of the underdrains and normal foundation drainage. Alternatively, deposition may have taken place in one zone for too long. These situations may give rise to a high internal phreatic surface with consequent seepage on the face of the dam, leading to erosion of solids and undercutting of formed tailings dam slope.

In such cases, deposition should be cycled to other areas of the dam in order to “rest” the affected area. The supernatant pond can also be moved away from the affected area by reducing the pond level or by increased beaching at a later stage to increase the beach width.

(iii) *Outer surface of the impoundment becomes inaccessible for workmen and machines*

This may occur if insufficient beach surface and “near surface” drying out occurs, normally for the same reasons as outlined in (ii) above. Alternatively, climatic conditions may depress the rate of evaporative drying achieved on the beach.

The remedy in both cases is as in (ii) above.

(iv) *Breakout through the outer bund*

Insufficient freeboard may cause release of tailings/water (breakouts) and this should be prevented by timeous raising of the outer bund. The spigotting system requires a high degree of mechanisation and labour attendance for the constant raising of the bund at the zone of deposition together with planning of future deposition areas. The periodic lifting of (ring) delivery mains must also be considered in this planning.

In general, all the above operating difficulties are accentuated in new dams where deposition is associated with high rates of deposit rise above the initial starter dams, and particular vigilance is needed at start-up, which often coincides with the use of inexperienced operators.

2.3. PADDOCK DEPOSITION SYSTEMS

Section 4.2.4 of ICOLD Bulletin 45 defines the paddock deposition system. More detailed comment and guidelines on placement follows below :

2.3.1. General

The paddock deposition technique of tailings deposition is applied in areas where climatic conditions allow a high nett evaporation and for tailings that is fine and virtually single particle sized, i.e. that does not allow easy application of cyclone or spigot deposition systems.

La réalisation des diguettes se fait manuellement (dans les régions à main-d'œuvre bon marché) ou par moyens mécaniques.

Cette technique est largement utilisée dans l'exploitation des mines d'or en Afrique du Sud.

La méthode des enclos (cuvettes) rencontre relativement peu de difficultés dans les exploitations d'or classiques. La méthode est bien rodée en Afrique du Sud depuis plus d'un demi-siècle, où c'est la méthode courante de mise en dépôt des stériles. Les diguettes sont normalement construites à l'aide d'engins de terrassement.

La méthode des enclos est peut-être surtout adaptée aux stériles à prédominance de silts et de sables très fins (de l'ordre de 60 à 86 % des grains inférieurs à 75 μ), à concentration relativement faible (30 à 40 %, en poids, d'éléments solides dans la boue). La boue est répartie sur le pourtour du dépôt dans un réseau d'enclos préalablement réalisés.

Les difficultés rencontrées découlent de quatre causes principales :

a) Variation de la granulométrie au-delà des limites définies lors du projet.

Une granulométrie plus grossière que prévu nuit au libre écoulement de la boue dans les canaux reliant la station d'alimentation aux enclos. Une granulométrie plus fine que prévu ne favorise pas la dissipation de l'eau interstitielle, et la consolidation se fait mal.

b) Variation de la teneur en eau des dépôts au-delà des limites définies lors du projet.

Cette variation résulte de cycles d'assèchement inadéquats. Les dépôts risquent d'être mal consolidés, renfermant un excédent d'eau interstitielle.

c) Altération chimique des caractéristiques des stériles.

Le résultat est généralement une réduction du taux d'infiltration dans les cuvettes, et les dépôts présentent les caractéristiques décrites sous *b)* ci-dessus.

d) Montée trop rapide du dépôt.

C'est la conséquence d'un débit d'alimentation trop élevé, avec pour résultat un dépôt mal drainé et mal asséché, renfermant un excédent d'eau interstitielle réduisant la résistance au cisaillement.

2.3.2. Conditions requises

Pour une bonne mise en place par la méthode du réseau d'enclos (cuvettes), les conditions à remplir sont les suivantes :

a) La pente des plages dans les cuvettes sera assez régulière et inclinée à 1/150 environ au plus.

Low cost labour or mechanised systems can be used for raising the bunds of the paddocks.

The gold mining industry in southern Africa uses this technique extensively.

There are comparatively few placement difficulties associated with conventional gold plant tailings deposited by paddock methods. The practice has been established in southern Africa for well over half a century and has been applied successfully to the greater proportion of gold mine tailings disposal facilities in that region. Mechanised systems are currently predominantly used for forming the paddock bunds.

The method is perhaps best suited to tailings of predominantly silt and very fine sand with typical gradings of between 60 % and 86 % finer than 75 microns and with slurry delivery concentrations of between 30 and 40 % by mass, i.e. a relatively dilute slurry. The delivered slurry is distributed around the perimeter by its flow in the pre-formed paddocks.

The difficulties which have developed with paddocking have arisen principally from four distinct causes :

a) Inconsistency in particle size and variation outside design limits.

A coarser-than-design grading will prevent the slurry from being transported to the paddocks in the open channels leading from the delivery station. A finer-than-design grading will prevent adequate release of pore water thus resulting in a poorly consolidated deposit.

b) Inconsistency in deposited moisture content and variation outside limits.

This results from inadequate drying cycles and can yield poorly consolidated deposits with trapped pore water.

c) Addition of chemicals causing property changes to the tailings.

Generally release of supernatant water is depressed, leading to the characteristics of *b)* above.

d) Excessive rates of rise of the impoundment.

This results from delivery tonnages to the dam being excessive and results in an inadequately drained and dried deposit, with trapped pore water reducing material shear strengths.

2.3.2. Review of requirements for paddocking

The paddocking system requires that the following conditions be met :

a) paddock beach slopes must be relatively consistent and should be less (shallower) than about 1 : 150,

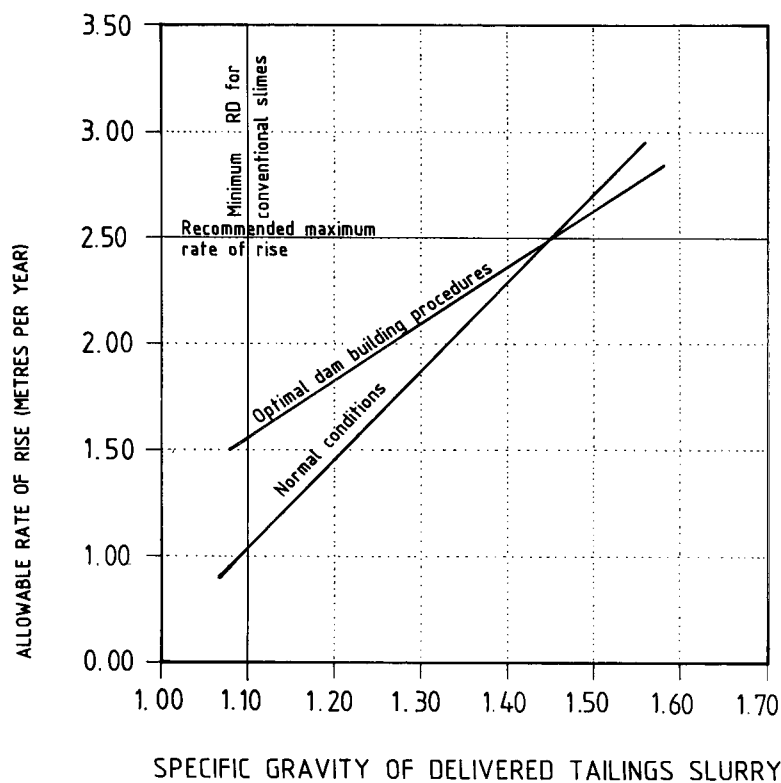
b) Les tassements et la consolidation primaire (ressuage) s'opéreront dans les délais prévus.

c) La boue décantée dans les cuvettes et dans la zone centrale du dépôt formera un massif stable après dessiccation, consolidation et amélioration des caractéristiques de cisaillement.

d) Les caractéristiques de séchage des boues déposées, pour des conditions climatiques données, seront telles qu'il soit possible de construire manuellement ou mécaniquement une diguette stable et peu perméable avant de commencer un nouveau cycle d'épandage des boues; le rythme de montée du dépôt doit donc être calculé en fonction des conditions climatiques du site.

Si un seul de ces critères n'est pas satisfait, la méthode n'est pas applicable, ou il faut adopter des précautions spéciales.

La Fig. 7, établie d'après les expériences Sud-africaines, propose des courbes de rythme de montée admissible en fonction de la densité relative de la boue, pour les stériles produits par les mines d'or, dans le cas de la méthode de construction utilisant un réseau de cuvettes. On peut se servir de ce graphique pour choisir la superficie du dépôt en fonction du débit de boue et de la densité sèche supposée des matériaux mis en place.



b) settlement and primary consolidation (bleeding) of the slurry must occur within specified time limits,

c) the settled slurry in the paddocks and the central zone of the impoundment must be allowed to dessicate, consolidate and improve in shear strength to form a stable deposit,

d) the drying characteristics of the settled slurry must be such that, for the given climatic condition, a stable and relatively watertight bund can be packed by hand or mechanically to hold the next batch of slurry, i.e. the design rate of rise must be within acceptable limits for the climatology applying.

Should any one of these conditions not be met then either paddocking becomes impossible or special precautions must be adopted to achieve the required results.

Fig. 7 shows a proposed limitation based on experience in South Africa on the rate of rise for gold slimes placed by paddock system depending on the relative density of the delivered tailings slurry. The graph can be used to select the required plan size of the deposit depending on the delivered tonnage and anticipated dry density of the placed material.

Fig. 7

Allowable rate of rise (metres per year) vs. specific gravity of delivered tailings slurry

Rythme de montée admissible (m/an) en fonction de la densité relative de la boue de stériles

Minimum RD for conventional slimes

Densité relative minimale des boues courantes

Recommended maximum rate of rise

Rythme de montée maximal recommandé

Optimal dam building procedures

Méthodes de construction optimales du barrage

Normal conditions

Conditions normales

2.3.3. Difficultés susceptibles d'être rencontrées

Les principales difficultés rencontrées dans l'utilisation de la méthode du réseau d'enclos pour la mise en dépôt des stériles de mines d'or concernent les variations de la granulométrie et du taux de concentration au-delà des limites prévues dans le projet.

Elles résultent de variations inadmissibles des pentes des plages, des vitesses de séchage, des caractéristiques de tassement et des caractéristiques de retrait des matériaux. De plus, la forme des grains et leur composition chimique peuvent influencer ces facteurs.

Le rythme de montée du dépôt doit être conforme aux conditions locales (climat régional, fondation, caractéristiques des stériles).

Dans la construction par la méthode cellulaire, les difficultés de mise en place peuvent différer de celles énumérées ci-dessus.

2.3.4. Méthode cellulaire (voir aussi 2.1.2.c)

La méthode cellulaire est essentiellement identique à la méthode des enclos ci-dessus, pour les stériles à granulométrie fine et relativement uniforme, tels que ceux produits par les mines d'or.

Cependant, on peut utiliser cette méthode (à l'aide d'engins de compactage et de terrassement) pour d'autres classes de stériles, lorsqu'un niveau de sécurité élevé est exigé pour le barrage.

Les avantages de cette méthode sont :

- une bonne maîtrise de l'implantation des zones de dépôt,
- une densité en place élevée (sécurité vis-à-vis de la liquéfaction),
- un bon profilage des talus.

Cette méthode et ses applications sont décrites plus en détail dans la référence [4].

2.4. MISE EN PLACE PAR MOYENS MÉCANIQUES

La chapitre 4.2.5 du Bulletin 45 présente les éléments relatifs à la mise en place par moyens mécaniques. Des commentaires sur les limitations de cette méthode et sur les difficultés rencontrées sont présentés ci-dessous.

2.4.1. Généralités

Les matériaux à broyage fin sont généralement mal adaptés à une mise en place mécanique, étant

- trop humides pour le transport par camion ou tapis, sauf séchage par presse filtrante,

2.3.3. Summary of paddocking placement difficulties

The major placement difficulties associated with gold tailings paddocking are associated with variations outside acceptable limits of particle sizes and delivered slurry concentration.

The difficulties are occasioned by unacceptable variation in longitudinal paddock beach angles, drying rates, settlement characteristics and shrinkage characteristics of the tailings material. Particle shape and chemical composition can also influence the above factors.

Rate of rise must be within acceptable limits for the region climatology, the dam foundation and the tailings material properties.

Placement difficulties with cell construction may be different from those described above.

2.3.4. Cell construction (see also 2.1.2.c)

Deposition of tailings in cells is essentially the paddock technique described in detail in the preceding paragraphs for fine, relatively single sized tailings such as gold tailings.

Cell construction with the aid of mechanical equipment for compaction and berm formation can, however, be applied with other tailings categories where a high degree of security of dam construction is required.

The method offers

- good control over placement location
- high in situ densities for liquefaction control
- control over outer slopes.

This method and its application is more fully described in reference (4).

2.4. MECHANICAL PLACEMENT OF TAILINGS

Section 4.2.5 of ICOLD Bulletin 45 sets out the factors applying to the mechanical placement of tailings. Comment on placement limitation and difficulties follows :

2.4.1. General

Most fine grind tailings products are not suitable for mechanical placement as they generally

- are too wet to truck or transport by conveyor, unless a filter press is used for dewatering

- peu carrossables,
- générateurs de poussières à l'état sec.

Par contre, les moyens mécaniques conviennent aux matériaux grossiers (> 3 mm) ou aux matériaux plus fins après ajustement de la teneur en eau (cendres volantes, par exemple).

Dans les régions où l'eau est peu abondante, l'utilisation de presses filtrantes ou de filtres sous vide se généralise pour la réduction de la teneur en eau des stériles avant transport et mise en place. Mais après ce traitement, les stériles sont toujours loin d'être secs (teneur en eau de l'ordre de 25 %).

2.4.2. Limites d'application

a) Teneur en eau

La teneur en eau des stériles doit être suffisamment faible pour permettre leur transport par tapis transporteur ou camions (si aucun traitement supplémentaire n'est prévu à pied d'œuvre). Si les stériles sont transportés à l'état de boue, une réduction de la teneur en eau est à effectuer avant mise en place par les engins.

Un matériau avec une teneur en eau initiale égale à 25 % (à la sortie du tapis ou de la presse filtrante, par exemple) peut facilement devenir saturé après mise en place et consolidation, sous l'effet du poids propre. Pour cette raison, on applique les critères géotechniques classiques relatifs à la stabilité et à la liquéfaction des matériaux à l'état saturé.

b) Granulométrie

La mise en place par des moyens mécaniques concerne généralement les silts ou sables granulaires, bien drainants, et facilement manipulés par les engins. Les argiles et les boues ne conviennent pas.

c) Fondation

Comme pour tous les dépôts de stériles, la fondation doit être apte à supporter sans désordres les charges appliquées par les stériles.

2.4.3. Difficultés susceptibles d'être rencontrées

a) Densité après compactage

Les matériaux mis en place sans compactage (déversés par camion ou tapis transporteur) présentent une résistance au cisaillement faible et une forte perméabilité, et demandent une longue période de consolidation (tassements verticaux) lors de la montée du dépôt.

Cette montée peut également provoquer des cisaillements superficiels localisés, si le remblai n'a pas développé toute sa résistance au cisaillement par consolidation.

Dans le cas des mines de charbon, il y a risque de combustion spontanée due à un excès d'oxygène dans les terrils non compactés.

- are not easily trafficable
- will cause dust pollution if too dry.

Coarser products (+ 3 mm) or moisture controlled finer products such as power station fly ash can, however, be placed mechanically.

The use of filter press or vacuum filters for removing excess water from tailings before transportation and placement is becoming more predominant in areas where water availability is a problem. Nevertheless, the resultant tailings is not really dry and will still have a moisture content in the order of 25 %.

2.4.2. Limits of applicability of mechanically placed tailings

a) Moisture content :

The moisture content of the tailings must be low enough to allow transportation by conveyor belt or truck if the material is to be placed without further moisture reduction after transportation. If the tailings is transported as a slurry then its moisture content must be reduced sufficiently before mechanical placement can be successfully applied.

Tailings with an initial moisture content of 25 % (i.e. as discharged from a belt or filter press) can readily reach saturation level after placement and self weight consolidation. Therefore standard geotechnical stability and liquefaction considerations appropriate for saturated materials must still be applied.

b) Size distribution :

Tailings materials to be placed successfully by mechanical means would generally be granular sands or silts which can drain easily and which are easily workable by mechanical means. Clays and muds would not be easily handled by mechanical equipment.

c) Foundation strength :

As with all other tailings impoundments the underlying foundation strength must be adequate to receive the superimposed loading from the tailings.

2.4.3. Deposition difficulties relating to mechanically placed tailings

a) Compacted densities

Material placed loosely without compaction, such as tailings placed by tipper truck or from the end of a conveyor, will display low shear strength and high permeability and will have long vertical settlement (consolidation) characteristics as the deposit grows in height.

An increase in height may also be accompanied by local surface shear failures as the uncompacted material will not have gained its full consolidated shear strength.

In the case of coal waste, excess oxygen in uncompacted dry tips can lead to spontaneous ignition of the coal.

Une forte perméabilité permet l'infiltration de l'eau de pluie, avec remontée de la ligne de saturation. Il peut en résulter des ruptures par cisaillement.

Les talus non compactés sont vulnérables à l'érosion par la pluie et le vent.

Un compactage est à appliquer pour assurer une bonne densité du matériau mis en place.

b) *Teneur en eau*

Une trop forte teneur en eau des stériles mis en dépôt peut interdire l'accès aux engins de réglage et de compactage.

De plus, l'eau s'évacuera au pied du dépôt, avec risque d'érosion et de glissement en l'absence de drains filtrants.

High permeabilities will allow an excess of precipitation to enter the material thereby raising the phreatic line unduly. This may in turn lead to shear failures.

Uncompacted outer slopes will be prone to high erodability by wind and rain.

Compactive effort should be applied in order to ensure evenness of compacted density in the deposited material.

b) *Moisture content*

Excessive moisture content of the deposited tailings can prevent access for spreading and compaction machinery.

Furthermore, excess water will generally drain out through the toe of the deposit, leading to erosion and slumping of the toe if filter underdrainage is not provided.

3. OUVRAGES DE DÉCANTATION DES BARRAGES DE STÉRILES ⁽¹⁾

3.1. CONCEPTION DES OUVRAGES DE MAÎTRISE DE L'EAU

Pour la détermination des paramètres hydrauliques à prendre en compte dans la conception d'un ouvrage de décantation, il est nécessaire de comprendre le bilan hydraulique global de la retenue de stockage des stériles.

Les critères hydrauliques auxquels doit satisfaire le projet d'un dépôt et de son ouvrage de décantation sont les suivants :

3.1.1. On doit prévoir un réseau de drainage des eaux pluviales, garantissant la collecte et l'évacuation de toute l'eau tombant à l'extérieur de l'emprise du dépôt. Cette disposition sera définie pour une période de retour donnée d'orage, par rapport au risque de rupture du barrage en l'absence d'ouvrage de dérivation.

Dans les régions arides, on peut incorporer au projet la récupération de l'eau d'amont.

3.1.2. Tous les apports arrivant dans l'emprise du dépôt sont :

i) soit retenus dans cette emprise au moyen de bassins de pied ou, faute de mieux, directement sur le dépôt,

ii) soit traités par décantation et retournés au réseau d'alimentation industriel.

Généralement, on peut distinguer dans un dépôt trois zones hydrologiques différentes (voir Fig. 8) :

(a) *Zone 1* : La partie supérieure du dépôt et les bassins de reprise éventuels, reliés entre eux par une conduite. En cas de retenues en travers de vallée, le bassin versant amont est intégré dans cette zone s'il alimente les ouvrages de stockage à l'amont du barrage.

(b) *Zone 2* : Les talus extérieurs du dépôt ainsi que les bassins au pied de celui-ci qui retiennent l'eau de pluie et les produits d'érosion, ruisselant sur ces talus, et tout autre ouvrage de retenue associé.

(c) *Zone 3* : La zone à l'extérieur du dépôt, celui-ci étant protégé du ruissellement par le réseau de drainage.

(1) Avec nos remerciements à la Chambre des Mines d'Afrique du Sud.

3. TAILINGS DAM DECANT SYSTEMS ⁽¹⁾

3.1. DESIGN OF WATER CONTROL SYSTEMS

In order to arrive at hydraulic design parameters for a decant or penstock system it is first necessary to understand the overall water balance on the tailings impoundment.

The hydrological requirements which should be met by the design of any residue deposit and its associated decant system may be summarised as follows :

3.1.1. A system of storm water drains should be designed and constructed to ensure that all water which falls outside the area of the residue deposit is diverted clear of that deposit. This provision should be made for a defined return period storm, in relation to the risk of failure of the dam if diversion does not occur.

In arid regions, recovery of the clean upstream water can be incorporated into the design.

3.1.2. All water that falls within the area of the residue deposit should be either

- i) retained within that area either in the toe catchment paddocks or, if otherwise unavoidable, on top of the deposit; or
- ii) decanted and returned to the process.

Most residue deposits may be subdivided into three hydrological components, as illustrated in Fig. 8 :

(a) *Catchment 1* : The top area of the deposit together with any return water storage dams which have been provided and which are connected to the top area of the deposit by means of the outfall penstock. When considering cross-valley impoundments, the catchment of the valley upstream of the residue deposit should be included with the top area of the deposit if this feeds into the storage facilities of the dam.

(b) *Catchment 2* : The outer slopes of the residue deposit together with the toe catchment paddocks provided to receive stormwater run-off and erosion products from the slopes and any additional catchment dams associated with the slopes and catchment paddocks.

(c) *Catchment 3* : The area outside the residue deposit from which the water is diverted away from the deposit by the storm water drains.

(1) With acknowledgement to Chamber of Mines of South Africa.

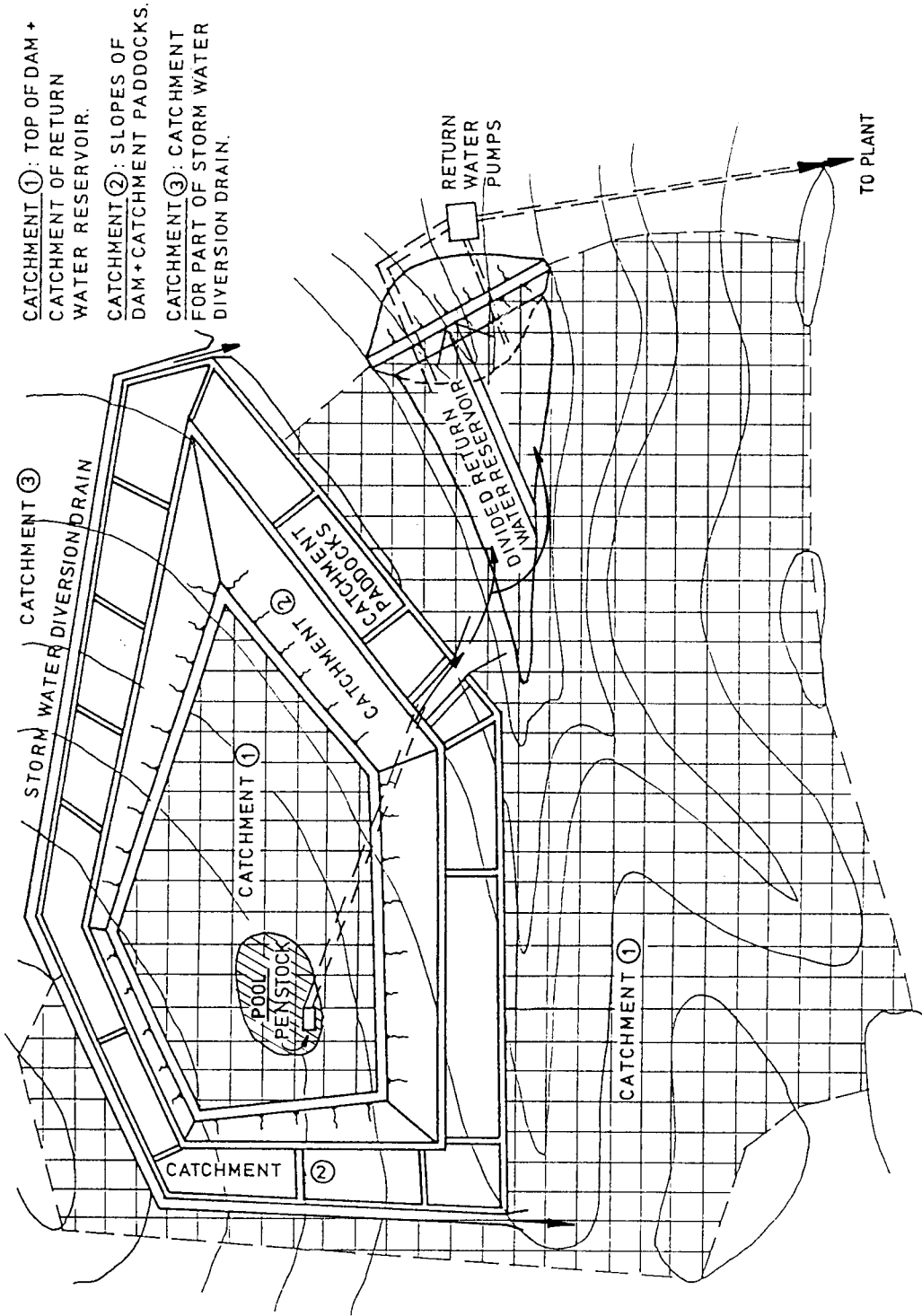


Fig. 8

Diagrammatic representation of hydrological components of a residue deposit

Schéma des différentes zones hydrologiques composant une zone de dépôt de stériles

Catchment ① : Top of dam + catchment of return water reservoir	Zone ① : Partie supérieure du dépôt + bassin de reprise
Catchment ② : Slopes of dam + catchment paddocks	Zone ② : Talus du dépôt + bassins de pied
Catchment ③ : Catchment for part of storm water diversion drain	Zone ③ : Zone à l'extérieur du dépôt protégée du ruissellement par le réseau de drainage
Storm water diversion drain	Drain de dérivation des eaux d'orage
Pool	Retenue
Penstock	Conduite
Catchment paddocks	Bassins de pied
Divided return water reservoir	Bassin de reprise
Return water pumps to plant	Pompes de reprise vers l'usine de traitement

La capacité de stockage de chaque ouvrage sera calculée pour maintenir une revanche suffisante au-dessus du niveau des plus hautes eaux lors de l'orage maximal prévu. Pour le choix de l'orage de projet, on préconise l'orage centennal (précipitations et ruissellements pendant 24 heures), ou tout autre orage de projet choisi en conformité avec le risque acceptable pour un barrage donné.

Il est également préconisé de vérifier la non-submersion de l'ouvrage en cas de crue maximale probable (PMF) (voir Bulletin n° 74, « Sécurité des Barrages de Stériles ») et on maintiendra toujours une revanche minimale de sécurité entre le niveau de l'eau correspondant à l'orage de projet et la crête du barrage.

Le dimensionnement de l'ouvrage de décantation sera tel que la durée de séjour de l'eau sur le dépôt ne soit pas excessive (par exemple, 1 à 5 jours).

Si le débit des pompes, pour retour de l'eau décantée à l'usine de traitement, est plus faible que celui de l'ouvrage de décantation, la retenue tampon de récupération de cette eau est dimensionnée de façon à stocker l'excédent.

3.1.3. On établit le bilan hydraulique pour chaque zone. Par exemple, pour une retenue entourée d'une digue en remblai (type « enclos ») avec ses bassins de reprise et d'évaporation, on comptabilise (Fig. 9) :

Les apports d'eau :

(a) Eau provenant de l'alimentation en boue de stériles.

(Dans les régions arides ou lorsque la récupération de l'eau est difficile ou coûteuse, des boues de concentration élevée limiteront les pertes d'eau. Une évaluation économique de solutions sera justifiée.)

(b) Pluie directe sur la retenue et sur la plage.

(c) Toute autre source d'eau arrivant dans la retenue.

Les débits sortants :

(a) Débit de la conduite d'évacuation vers le bassin de reprise.

(b) Percolations recueillies par l'éventuel réseau de drainage périmétral enterré, alimentant le bassin de reprise.

(c) Infiltrations dans la fondation ou les barrages périphériques (irrécupérables).

(d) Eau capillaire adhérent aux boues (dont la quantité dépend de la granulométrie des boues et de la méthode d'exploitation).

(e) Évaporation de la retenue de décantation et du (ou des) bassin(s) de reprise. Dans les régions arides, une évaluation précise de l'évaporation peut être nécessaire du fait qu'il peut y avoir un bilan hydraulique négatif.

The storage capacities for each water retention component should be sufficient to ensure a gross freeboard above the maximum predicted pool water level, that is sufficient to contain runoff from a design storm with adequate remaining safe nett freeboard. The design storm is suggested to be precipitation and runoff arising from a period of 24 hours with a frequency of 1 : 100 years, or other appropriate design storm selected in accordance with the acceptable risk for a particular dam.

As recommended in ICOLD Bulletin 74 “ Tailings Dam Safety ”, the storage facility should also be checked against overtopping for the case of the Probable Maximum Flood (PMF), and a minimum allowable safe freeboard from the water surface level after a design storm, to the crest of the outer dam, should always be maintained.

The decant facility for removing the water from the top of the impoundment should have a capacity to do so within a reasonable length of time (say 1 to 5 days).

If the pumping system for returning the decanted water to process is of smaller hydraulic capacity than that of the decant facility then the intermediate return water storage reservoir must be able to store the excess.

3.1.3. For each of the hydrological sub-systems a water balance should be set up. For example, the water balance for the top area of a hydraulic fill ring-dyke (paddock type) impoundment and its associated return water storage and evaporation reservoirs would have the following components (see Fig. 9) :

The water input would consist of :

(a) The feed from the slimes delivery line.

(In arid regions or where water recovery is difficult or expensive, high concentration slurries will limit water loss on the dams. An economic evaluation of alternatives would be warranted.)

(b) Rainfall on the pool and beach surfaces of the impoundment.

(c) Any additional water which must be disposed of on the surface of the impoundment.

The water output would consist of :

(a) The discharge from the penstock to the return water reservoir.

(b) The seepage into the underdrainage system (if any) which surrounds the slimes impoundment and which is fed back to the return water reservoir.

(c) Seepage losses into the foundation or surrounding dams which are irrecoverable.

(d) Moisture retained in the slimes by capillary action (the proportion of moisture retained in this way will depend on the particle size analysis of the residue and the way in which the deposit is managed).

(e) Evaporation from the surface area of the stored water surfaces of the impoundment and the return water reservoir or reservoirs. In arid regions a precise evaluation of evaporation may be necessary as a negative water balance could result.

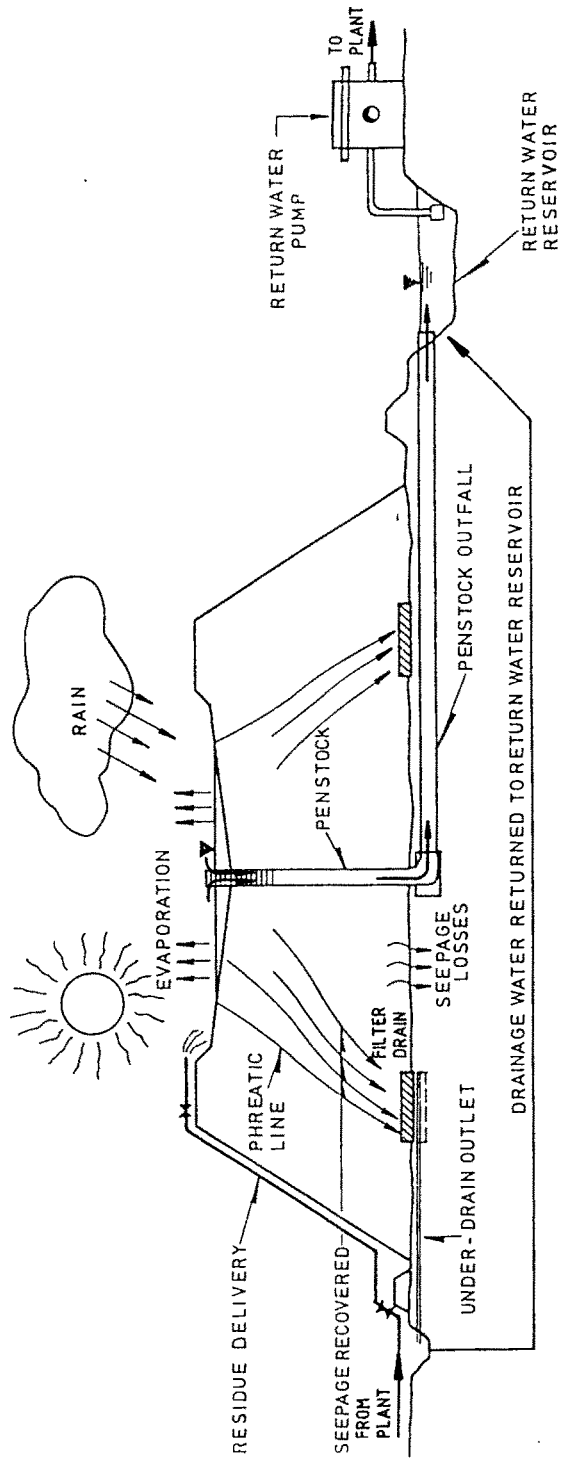


Fig. 9

Diagrammatic representation of the water balance for a residue deposit
Représentation schématique du bilan hydraulique d'un dépôt de stériles

Rain	<i>Précipitations</i>
Evaporation	<i>Évaporation</i>
Residue delivery from plant	<i>Arrivée des boues depuis l'usine</i>
Seepage recovered	<i>Percolations récupérées</i>
Phreatic line	<i>Ligne de saturation</i>
Filter drain	<i>Drain filtrant</i>
Under-drain outlet	<i>Exutoire du drain</i>
Seepage losses	<i>Pertes par infiltration</i>
Penstock	<i>Conduite en puits</i>
Penstock outfall	<i>Conduite d'évacuation enterrée</i>
Return water reservoir	<i>Bassin de reprise</i>
Drainage water returned to return water reservoir	<i>Eau drainée acheminée vers le bassin de reprise</i>
Return water pump to plant	<i>Pompe de reprise vers l'usine de traitement</i>

(f) L'évaluation des pertes par évaporation des plages nécessite une grande attention, car ces pertes peuvent avoir été déjà prises en compte comme pertes d'eau dans les vides des éléments solides stockés.

Sur une période donnée pendant la vie du barrage, la variation du stockage est égale à la différence entre les débits entrants et sortants. Par intégration des variations, on peut connaître à tout moment le niveau d'eau sur la surface du dépôt et dans le bassin de reprise. Ce niveau ne doit jamais dépasser le niveau des plus hautes eaux (il ne doit pas mordre sur la hauteur de revanche prévue dans le projet).

Outre le calcul du volume de la retenue de stockage et de la revanche à prévoir, les paramètres à prendre en compte pour le dimensionnement du dispositif d'évacuation sont le volume de la retenue principale, l'importance du bassin versant, les pertes de la retenue de reprise (évaporation, infiltration), le débit des pompes de reprise. Ainsi, on établit le bilan complet pour chacune des trois zones hydrologiques précitées.

3.1.4. Au cours de l'exploitation, des inspections périodiques seront effectuées pour vérifier le bon comportement de l'installation et les observations seront enregistrées.

3.2. CONCEPTION DES OUVRAGES DE DÉCANTATION

Trois aspects sont à prendre en compte.

3.2.1. Conception hydraulique

a) Conduites en puits

On distingue deux types principaux de conduite en puits :

(i) Construction en anneaux emboîtés (voir Fig.10), en béton armé ou en acier. Les anneaux sont empilés au fur et à mesure de la montée des résidus dans la retenue. Le fonctionnement d'un tel ouvrage est celui d'un évacuateur en puits à seuil mince, ou d'un évacuateur en tulipe.

(ii) Construction de la tour en éléments en forme de U, en béton armé, bois ou briques. La hauteur du seuil est réglée en glissant des panneaux en béton armé ou des planches en bois dans les rainures prévues sur l'une des faces de la tour. Le fonctionnement d'un tel ouvrage est celui d'un seuil en mince paroi.

Dans les deux cas, la hauteur maximale est limitée à 20 m environ, compte tenu des limitations de résistance à la compression sous l'effet des sollicitations verticales appliquées sur la paroi externe par les matériaux stockés.

Le calcul du débit pour ces deux types de conduite et pour différentes hauteurs d'eau sur le seuil est donné dans l'annexe A.

Outre ces deux types d'évacuateur, d'autres solutions existent. En effet, on a utilisé (et on peut toujours utiliser) d'autres types de construction et de matériau.

(f) Care should be taken in evaluating loss of water by evaporation from the tailings beach surfaces, as this loss may have already been accounted for as a loss in the voids of the stored tailings solids.

Over any interval of time during the life of the dam, the change in storage will equal the inflow minus the outflow while the integral of the changes in storage may be used to calculate the water level at any time, both on the top of the impoundment and in the return water reservoir. At no time should the calculated water level encroach on the minimum design freeboard.

In addition to calculating the storage capacity and freeboard of the surface of the residue deposit, the penstock off-take rate should be matched to the storage volume, the rainfall catchment and the evaporation and seepage losses of the return water reservoir as well as the return water pump capacity. Thus a complete water balance model must be constructed for each of the three hydrological sub-systems of the residue deposit.

3.1.4. During operation of the facility, periodic safety inspections should be made to ensure on-going adequacy of the installation, and the observations recorded.

3.2. DESIGN OF THE DECANT PENSTOCK AND OUTFALL PIPE

Three aspects need to be considered in designing the decant penstock and outfall pipe :

3.2.1. Hydraulic design

a) Shaft penstocks

Shaft penstocks are generally of (but not limited to) two types :

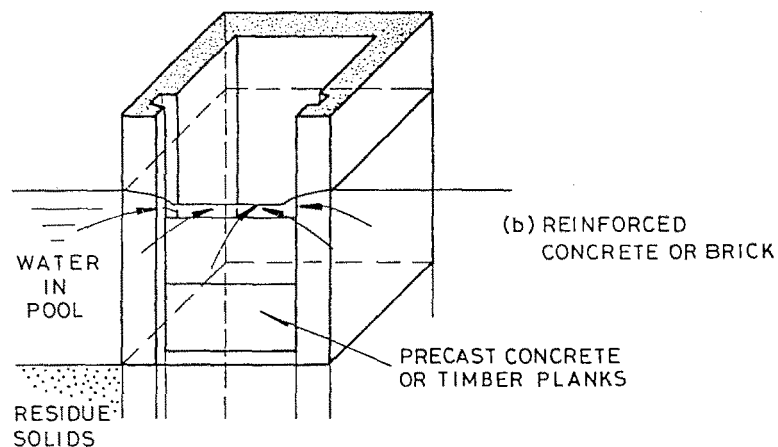
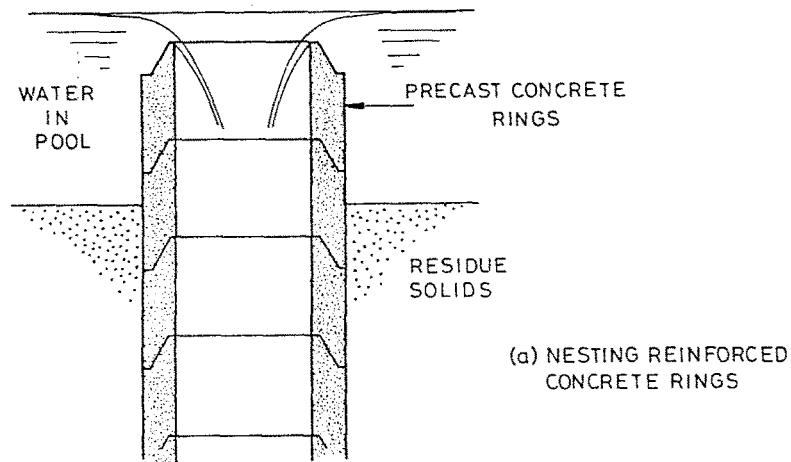
(i) Penstocks constructed of nesting reinforced concrete rings (see Fig. 10) or steel pipe sections. The crest height of this type of penstock is adjusted by adding rings/pipe sections as the level of the residue in the dam rises. The penstock functions as a sharp crested shaft or “ morning glory ” spillway.

(ii) Penstocks constructed as “ U-shaped ” reinforced concrete, timber or brickwork towers. In this case the crest height is adjusted by adding reinforced concrete slats or planks to the slotted fourth side of the tower. This type of penstock functions as a sharp crested weir.

Both of these penstock types have a limited maximum height of about 20 m, due to compressive strength limitations caused by down-drag forces.

The hydraulic capacities of both types of penstock for different heads above the crest may be calculated as shown in Appendix A.

The above two examples do not exhaust the possibilities. Several other types of construction and materials have also (and may still be) used successfully.



En général, le débit de la conduite d'évacuation sous remblai sera faible, et il existe un risque de colmatage partiel si des éléments solides sont entraînés sur le seuil du déversoir ou à travers des fissures dans le puits. Pour minimiser ce risque et en même temps éviter des points bas en cas de tassements différentiels, la conduite sera posée avec la plus grande pente possible.

b) *Dispositifs de pompage*

L'eau surnageant peut également être évacuée par des dispositifs de pompage flottants ou remorqués.

Le débit d'une pompe étant relativement constant, sans auto-régulation partielle comme dans le cas des dispositifs gravitaires, une attention particulière sera

Fig. 10

Two common types of shaft penstock

Deux types classiques de puits d'évacuation

- | | |
|---------------------------------------|---|
| (a) Nesting reinforced concrete rings | (a) <i>Anneaux en béton armé emboîtés</i> |
| Water in pool | <i>Retenue</i> |
| Precast concrete rings | <i>Anneaux en béton préfabriqués</i> |
| Residue solids | <i>Dépôt de résidus</i> |
| (b) Reinforced concrete or brick | (b) <i>Béton armé ou briques</i> |
| Water in pool | <i>Retenue</i> |
| Precast concrete or timber planks | <i>Panneaux en béton préfabriqués ou planches en bois</i> |
| Residue solids | <i>Dépôt de résidus</i> |

For most of the time the penstock outfall pipe will carry only a small flow. There is therefore a danger of siltation of the pipe should solid material enter the pipe over the crest of the penstock or through crevices in the shaft. To minimize this possibility and to avoid the formation of "slacks" should the pipe settle differentially, the gradient of the outfall should be made as steep as practicable.

b) *Pumped decants*

Floating or trailer mounted pumpstations may be used for decanting of supernatant water.

As the pump flow rate is relatively constant and not partly self regulating as in the case of a gravity decant, careful attention must be paid to pump sizing to allow

portée au dimensionnement des pompes, compte tenu du temps de mise hors service pour entretien et de la nécessité d'évacuer l'eau de pluie éventuelle sans compromettre la revanche minimale nécessaire.

L'évaluation du risque de rupture du barrage due à une défaillance du système de pompage peut démontrer la nécessité de prévoir des évacuateurs de secours pour réduire ce risque. A mesure que le barrage de stériles montera, des seuils successifs d'évacuation seront installés.

c) *Dispositifs divers*

Il existe d'autres dispositifs de décantation qui ne sont pas traités dans le présent Bulletin :

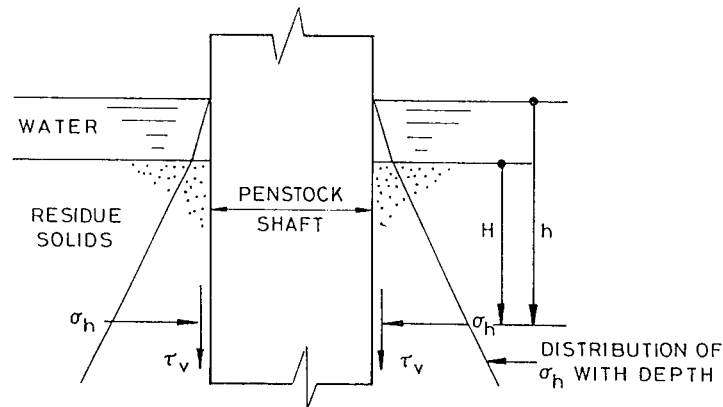
- siphons,
- évacuateurs latéraux,
- galeries inclinées en rive.

3.2.2. Puits et conduite sous remblai

a) *Résistance mécanique du puits*

Le puits doit résister à la pression latérale exercée par les résidus et aux sollicitations verticales dirigées vers le bas (frottement sur la paroi) créées par le tassement des stériles (voir Fig. 11). La pression latérale est prise égale à $(0,6 \times$ la pression effective des résidus) + (la pression hydrostatique). Pour la force verticale, on prend la tangente de l'angle de résistance au cisaillement multipliée par la pression effective latérale.

En région sismique, on tient compte des effets des sollicitations sismiques associés au comportement des stériles liquéfiés situés autour du puits (voir Bulletin 74).



$$\sigma_h = \gamma_w h + 0,6 \gamma' H$$

$$\tau_v = 0,6 \gamma' H \tan \phi'$$

γ_w = DENSITY OF WATER ;

γ' = SUBMERGED DENSITY OF RESIDUE

ϕ' = ANGLE OF SHEARING RESISTANCE

ϕ = ANGLE OF WALL FRICTION

for pump maintenance time and removal of stormwater, while always maintaining the recommended minimum freeboard.

In assessing the risk of failure of the dam through failure of the pumping system, it may become necessary to provide emergency spillways to limit this risk. As the top level of a tailings dam may be constantly rising, spillways at intermittent levels will be required.

c) *Other decants*

Other types of decants not specifically addressed in this publication but which have been successfully used are :

- siphon decants
- side-hill spillways
- side-hill (inclined) intake shafts.

3.2.2. The decant penstock shaft and outfall pipe

a) *Strength of shaft* (shaft penstock)

The shaft should be designed to resist both the lateral pressure of the residue and the frictional down-drag caused by settlement of the residue which surrounds the shaft (see Fig. 11). It is recommended that the design lateral pressure be taken as 0,6 times the effective overburden pressure of the residue plus the water pressure, while the down-drag be taken as the tangent of the angle of shearing resistance times the effective lateral pressure.

In seismically active areas, the effect of seismic forces in conjunction with liquefied tailings surrounding the shaft should be considered, as recommended in ICOLD Bulletin 74.

Fig. 11

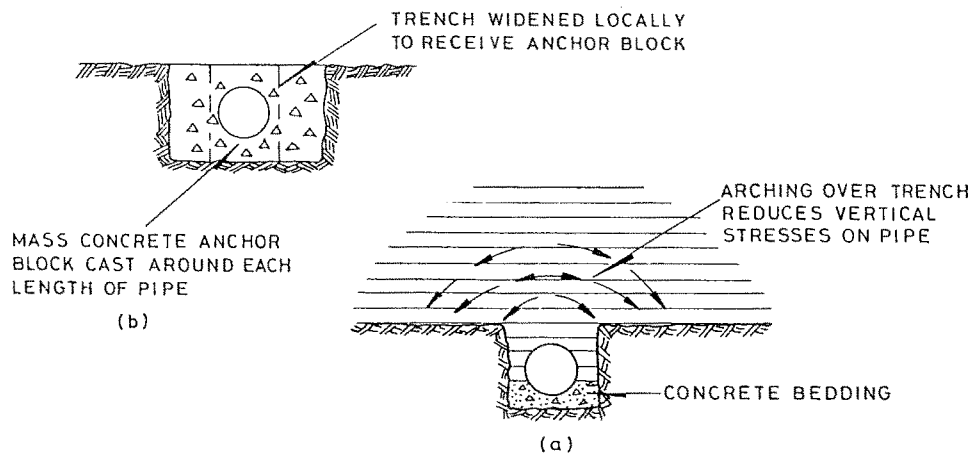
Stresses acting on a penstock shaft

Contraintes appliquées sur le fût d'un puits d'évacuation

Water	<i>Eau</i>
Residue solids	<i>Dépôt de résidus</i>
Penstock shaft	<i>Fût du puits</i>
Distribution of σ_h with depth	<i>Répartition de σ_h en fonction de la profondeur</i>
γ_w = density of water	<i>γ_w = densité de l'eau</i>
γ'_r = submerged density of residue	<i>γ'_r = densité immergée des résidus</i>
ϕ' = angle of shearing resistance	<i>ϕ' = angle de résistance au cisaillement</i>
δ = angle of wall friction	<i>δ = angle de frottement sur la paroi</i>

b) *Résistance mécanique de la conduite sous remblai*

Pour le dimensionnement de cette conduite, on prend la valeur (sans réduction) de la pression totale appliquée par les résidus. Compte tenu des tassements différentiels presque inévitables, on prévoit des joints souples afin que la conduite puisse suivre le profil changeant de son assise, sans rupture. Il est préférable de poser la conduite en tranchée (voir Fig. 12) afin de réduire les effets de la force appliquée par les résidus; on peut ainsi tenir compte, dans les calculs, de l'effet de voûte. La pose sur appuis ponctuels est à proscrire, compte tenu du risque de fléchissement des tronçons entre appuis (report de charge par frottement, ...) (voir également l'Annexe B).



c) *Poussée verticale ascendante*

La conduite ne transitant généralement qu'un très faible débit, elle est soumise à une poussée ascendante et aura tendance à « flotter » vers la surface si elle n'est pas ancrée. Cet ancrage est constitué généralement d'un bloc de béton coulé, enrobant la conduite (un bloc pour chaque élément de conduite). Le coefficient de sécurité par rapport à cette force ascendante doit être pris égal à 1,2 au minimum (voir Fig. 12).

d) *Conception et sécurité*

Il est à noter que les incidents récents survenus à des barrages de stériles comprennent une forte part de ruptures attribuables à la tenue mécanique insuffisante du dispositif de décantation. Pour cette raison, on doit porter une attention particulière à cet ouvrage.

b) *Strength of penstock outfall*

The penstock outfall should be designed to resist the full total overburden stress exerted by the residue. As it is always likely that the outfall will be subjected to differential settlement, it should be provided with flexible couplings or joints to allow it to conform to the changing profile of its bed without rupturing. To reduce the effect of the overburden stress on the walls of the pipe, it is preferable to lay the outfall in a trench (see Fig. 12) and the “negative projection” achieved in this way may be taken into account in the design. The pipe should never be supported on pedestals clear of the ground as it will then become subject to down-drag and bending between points of support. (See Appendix B for further details).

Fig. 12

(a) Method of laying penstock outfall in trench to achieve lower stresses by “negative projection”

(a) *Méthode de pose de la conduite en tranchée
pour obtenir une réduction des contraintes par effet de voûte*

Arching over trench reduces vertical stresses on pipe	<i>Effet de voûte au droit de la tranchée, réduisant les contraintes verticales appliquées sur la conduite</i>
Concrete bedding	<i>Lit en béton</i>

(b) Method of anchoring pipe against floating

(b) *Méthode d'ancrage de la conduite pour contrecarrer la poussée ascendante*

Trench widened locally to receive anchor block	<i>Élargissement local de la tranchée au droit du bloc d'ancrage</i>
Mass concrete anchor block cast around each length of pipe	<i>Bloc d'ancrage en béton enrobant chaque élément de la conduite</i>

c) *Floating of penstock outfall*

Because the outfall pipe usually carries only a trickle of water, it will have positive buoyancy with respect to the residue and will float to the surface unless it is anchored. Anchorage is usually provided by casting mass concrete anchor blocks over and around the penstock outfall (one block per length of pipe). The calculated factor of safety against floating should be at least 1.2. (See Fig. 12).

d) *Safety in design*

It is important to note that recent records of tailings dam incidents has a high predominance of failures related to the structural inadequacy of the decant system. Therefore a strong emphasis needs to be placed on these critical components of the tailings dam.

3.3. CONDITIONS D'ABANDON DES OUVRAGES DE DÉCANTATION

3.3.1. Lors de la fermeture du dépôt de stériles, le dispositif de décantation ne doit pas constituer une source éventuelle d'incidents (rupture, risque pour les personnes et l'environnement). A cet effet, il doit être dans un état tel (après modification, si nécessaire) qu'il ne constitue pas un chemin de fuite pour les résidus du dépôt. En outre, on doit s'assurer qu'il reste apte à empêcher toute lâchure intempestive de l'eau située sur le dépôt.

Les dispositions réglementaires diffèrent d'un pays à l'autre. Certaines administrations jugent les dispositifs enterrés inacceptables, du point de vue de la maîtrise des crues après abandon de l'exploitation, compte tenu des risques d'obturation par les corps flottants, de détérioration, et de l'entretien permanent indispensable. Souvent, on n'accepte que les évacuateurs avec coursiers à l'air libre pour l'évacuation des crues après la fermeture du dépôt.

3.3.2. De même que dans le cas d'un barrage en exploitation, on doit tenir compte des critères de sécurité hydrologiques en cas d'abandon. La crue maximale probable (PMF) sera retenue pour cette évaluation, bien que la crue centennale soit souvent admise. Dans tous les cas, on examinera le niveau de risque associé au déversement d'une crue sur le barrage, par rapport aux conséquences d'une rupture provoquée par la crue de projet choisie.

3.3.3. Lors de l'évaluation des risques éventuels présentés par les ouvrages de décantation (rupture, risques pour les personnes et l'environnement), on doit étudier les scénarios suivants en vue de déterminer les moyens pratiques d'y faire face :

(i) Rupture du puits ou de la conduite sous remblai provoquée par la consolidation (tassement) de la fondation; cisaillement dû à une instabilité des talus du dépôt; écrasement de la conduite sous le poids des matériaux; corrosion des parties métalliques; pourriture des parties en bois; toute autre détérioration des matériaux utilisés.

(ii) Entrée dans le dispositif (puits, conduite) de résidus passant par des joints ouverts ou des fissures, résultant notamment d'un défaut de construction ou de déformations excessives.

(iii) Effondrement du puits ou de la conduite, par suite de la perte d'appui due à l'érosion par les transports solides.

(iv) Rupture de l'ouvrage au droit de singularités : changement de section (par exemple, passage d'une section carrée à une section ronde en anneaux de béton préfabriqués), variations des caractéristiques de la fondation (passage d'une roche à un sol), etc.

3.3.4. En cas d'incident sur un dispositif de décantation, on choisit la mesure corrective appropriée parmi la liste suivante :

(i) Surélévation du seuil d'entrée du puits, éliminant toute possibilité d'entrée d'eau sauf lors de l'orage prédéfini (période de retour, durée), correspondant à une

3.3. CLOSURE CONDITIONS FOR DECANT PENSTOCKS AND OUTFALL PIPES

3.3.1. Penstocks and outfall pipes should be left in such a state at closure that they do not constitute a potential source of problem, failure or risk to persons and the environment. To this end all penstocks and outfalls should be in such a condition or be so modified that they do not constitute a means whereby residue may escape from the deposit. A check should be made to ensure that the penstocks and outfalls are adequate to prevent the uncontrolled release of water from the surface of the deposit.

Although regulations vary from country to country, there are agencies that do not consider any buried decant system to be appropriate for post-closure flood routing due to concerns regarding plugging by trash, deterioration and the need for perpetual maintenance. Open channel spillways are often considered the only acceptable means for closure flood routing.

3.3.2. As in the case for the operating dam, hydrological criteria for safety of the dam after closure must be carefully considered. The Probable Maximum Flood should be considered for this evaluation although the 100-year design flood is often accepted for this purpose. In all cases the risk associated with flood water overtopping the dam should be examined in relation to the consequences of a failure occurring and an appropriate design flood chosen.

3.3.3. In determining whether a penstock or outfall constitutes a potential source of problem, failure or risk to persons and the environment, the possible development of the following types of problem should be considered and the best practicable means taken to obviate them :

(i) Fracture of the penstock outfall pipe as a result of consolidation settlement of the foundation soil, shearing resulting from instability of the slopes of the deposit, crushing of the pipe by the overburden pressure, corrosion of steel components, or rotting of timber components or any other form of deterioration of the structural material;

(ii) the flow of residue into the penstock or outfall through open joints or cracks caused, for example, by poor construction or excessive deformation;

(iii) the collapse of the penstock or outfall as a result of loss of support by the erosion of solids into the penstock or outfall;

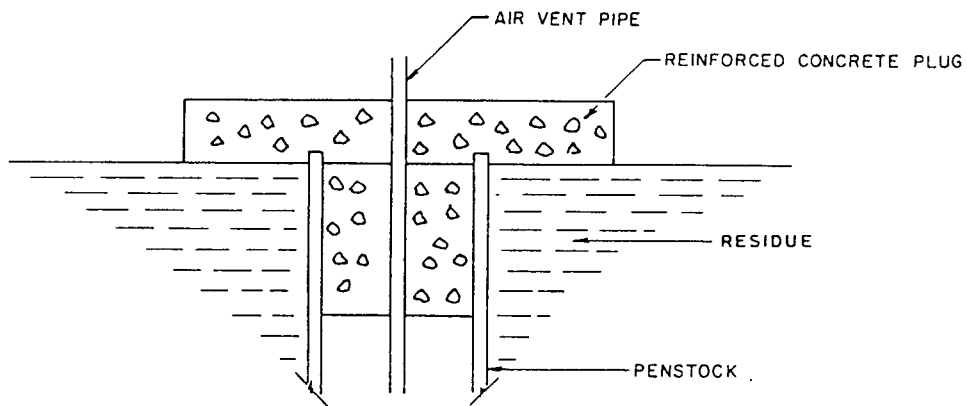
(iv) structural failure at positions where the section of the penstock changes, e.g. where a box penstock is converted to a precast concrete ring type or where the foundation support changes, e.g. from rock to soil.

3.3.4. In the case of a penstock or outfall failure, the following possible remedial measures should be considered and the most appropriate selected :

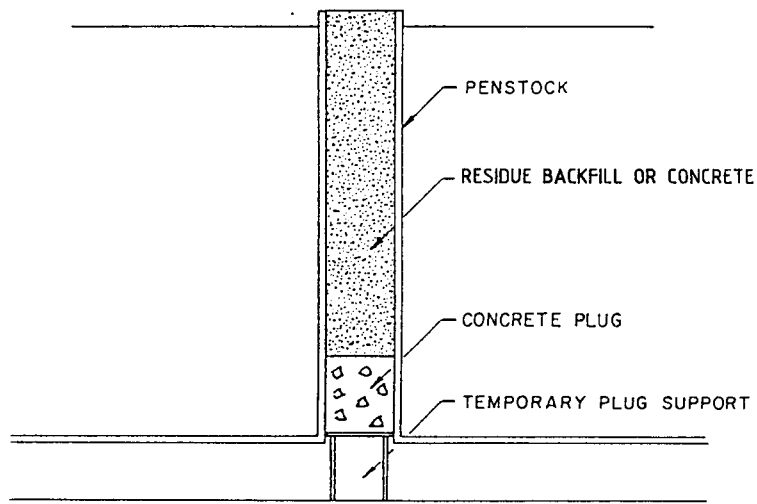
(i) The penstock inlet may be raised so that it is no longer possible for water to enter the penstock except during a storm of a defined duration and recurrence

probabilité minimale de submersion. On préconise l'orage centennal d'une durée de 24 heures ou, dans les cas très sensibles, la crue maximale probable.

(ii) Blocage ou fermeture du puits et de la conduite. On peut le réaliser en coulant un bouchon dans le puits (Fig. 13) ou, de préférence, en bétonnant la



a) PENSTOCK CLOSURE - TOP



b) PENSTOCK CLOSURE - BOTTOM

interval which it is considered provides a minimum practical probability of overtopping. It is recommended that a storm of 24 hour duration and 100 year recurrence interval be considered, or in critical cases the probable maximum flood.

(ii) The penstock shaft and pipe may be blocked or closed. This may be effected by plugging the inlet as shown in Fig. 13 or preferably by concreting closed

Fig. 13

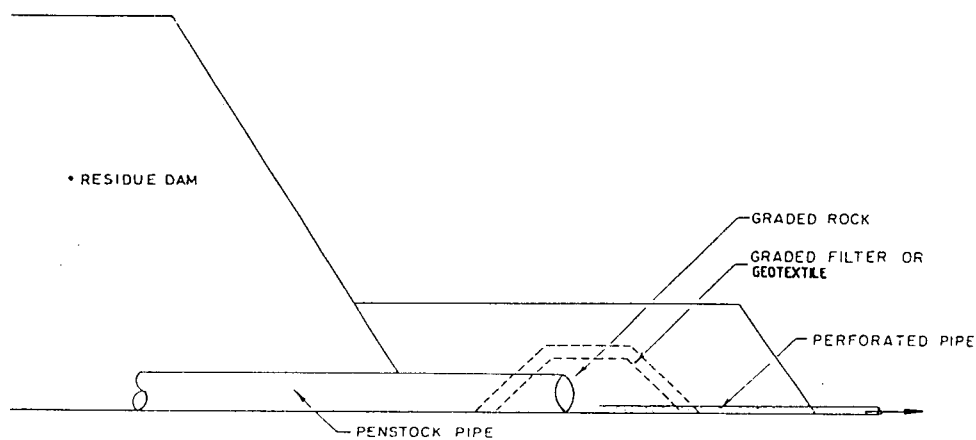
Methods of closing or plugging penstocks

Méthodes d'obturation des puits

- | | |
|--|--|
| <p>a) Penstock closure-Top
 Air vent pipe
 Reinforced concrete plug
 Residue
 Penstock</p> | <p>a) <i>Fermeture au sommet du puits</i>
 <i>Reniflard</i>
 <i>Bouchon en béton armé</i>
 <i>Dépôt de résidus</i>
 <i>Puits</i></p> |
| <p>b) Penstock closure - Bottom
 Penstock
 Residue backfill or concrete
 Concrete plug
 Temporary plug support</p> | <p>b) <i>Fermeture au fond du puits</i>
 <i>Puits</i>
 <i>Remplissage en résidus ou béton</i>
 <i>Bouchon en béton</i>
 <i>Support provisoire du bouchon</i></p> |

totalité du puits et de la conduite. Dans ces cas, on doit prévoir un autre dispositif d'évacuation des crues. Dans beaucoup de pays, la seule méthode acceptable est la fermeture par bétonnage complet de l'ouvrage de décantation, ce qui élimine tout risque de rupture.

(iii) Si la conduite transite un débit solide, sans possibilité de fermeture comme ci-dessus, on peut construire un massif de pied avec filtre inversé, au droit de l'exutoire de la conduite (Fig. 14).



(iv) En cas de débit liquide continu, on recommande, comme méthode de collecte et d'évacuation, la réalisation de retenues de décantation et d'évaporation.

the entire penstock shaft and outfall pipe. In these cases the dam must be provided with an alternative means of safely removing flood waters. In many countries the only acceptable closure method is that of complete concreting closure of the decant system, thereby eliminating all potential risk of failure.

(iii) If tailings are being washed out of an outfall pipe and it is not possible to plug or concrete the penstock completely, a reverse filter and buttress may be constructed around and over the penstock outlet in the manner shown in Fig. 14.

Fig. 14

Penstock closure - Buttress (only for the case where concreting of the penstock outlet pipe is not possible)

Abandon - Massif à l'exutoire de la conduite (dans le cas seulement où le bétonnage de la conduite n'est pas possible)

Residue dam	<i>Barrage de stériles</i>
Penstock pipe	<i>Conduite</i>
Graded rock	<i>Enrochement trié</i>
Graded filter or geotextile	<i>Filtre ou géotextile</i>
Perforated pipe	<i>Tuyau perforé</i>

(iv) The recommended method of handling continued flow from a penstock or outfall pipe is to provide settling and evaporation reservoirs to catch the seepage water and dispose of it.

4. REFERENCES

GENERAL / GÉNÉRALITÉS

- [1] ICOLD Bulletin 44 a (1989) : *Bibliography, Mine and Industrial Tailings Dams and Dumps* / Bulletin CIGB 44 a : *Barrages et Dépôts de Stériles Miniers et Industriels*.
- [2] ICOLD Bulletin 45 (1982) : *Manual on Tailings Dams and Dumps* / Bulletin CIGB 45 (1982) : *Manuel des Barrages et Dépôts de Stériles*.
- [3] VON M. WAGENER, F. and WATES, J. A. *Geotechnical investigation and design of tailings dams on dolomite foundation*, International Congress on Large Dams, Rio de Janeiro, 1982. Vol. 2, pp. 719-736.
- [4] LIGHTHALL, P. A., WATTS, B. D. and RICE, S. *Deposition Methods for Construction of Hydraulic Fill Tailings Dams*. Proceedings, Symposium on Geotechnical Aspects of Tailings Disposal, Vancouver, May 1989.

SLURRY TRANSPORTATION IN PIPELINES AND SLURRY PUMPS / TRANSPORT DES BOUES PAR CONDUITES ET POMPES A BOUE

- [5] GOVIER and AZIZ : *The Flow of Complex Mixtures in Pipes*. Van Nostrand 1973.
- [6] DURAND, R. and CONCOLIUS, G. *The Hydraulic Transport of Coal and Solid Particles in Pipes*. Proceedings, Colloquium on Hydraulic Transport National Coal Board, London, 1952.
- [7] WAST, E. J., KANY, J. P. and GANDHI, R. L. *Solid-liquid flow slurry pipelines transportation*. Trans-Tech, 1977.
- [8] WILSON, K. C. *A unified physically based analysis of solid-liquid pipeline flow*. Proceedings, Hydrotransport 4 Conference, Banff, 1976.
- [9] WILLIAMSON, J. R. G. *The use of computers for heterogeneous slurry pumping analysis*. Bulk Solids Handling. Vol. 3, No. 1, March 1983.
- [10] *Proceedings*, BHRA (UK) Hydrotransport series of Conferences (1 to 12), 1970 to 1993.
- [11] *Proceedings*, Slurry Transport Association (USA) series of Conferences (1 to 11), 1972 to 1988.
- [12] WILLIAMSON, J. R. G. *State of the Art : The Hydraulic Transportation of Solids in Pipelines*. Proceedings, International Conference on Mining and Waste Management, Johannesburg, 1987.

TRANSPORT IN GRAVITY FLUMES / TRANSPORT GRAVITAIRE PAR CANAUX

- [13] LAU, H.H. *Literature Survey on Slurry Transport in Flumes*. BHRA Fluid Engineering, UK, 1979.
- [14] FADDICK, R. R. *Slurry Flume Design*, Proceedings, BHRA Hydrotransport 10 Conference, Innsbruck, 1986.

HYDROCYCLONES / HYDROCYCLONES

- [15] *Proceedings*, BHRA (UK) : Third International Conference on Hydrocyclones, 1987.
- [16] Proprietary cyclone performance prediction computation methods held by various hydrocyclone manufacturers.

TAILINGS DAM DECANTS / OUVRAGES DE DÉCANTATION DES BARRAGES DE STÉRILES

- [17] Chamber of Mines of South Africa : *The design, operation and closure of Metalliferous and Coal Residue Deposits*.
- [18] US Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation. *Design of Small Dams*.
- [19] YOUNG, D. C. and TROTT, J. J., 1984. *Buried Rigid Pipelines*. Elsevier Applied Science, London.

ANNEXES / APPENDICES

Annexe A. Hydraulique des déversoirs

Appendix A. Hydraulics of spillways

Annexe B. Dimensionnement des puits et des conduites de décantation sous remblai

Appendix B. Structural design of decant penstock towers and outfalls

HYDRAULIQUE DES DÉVERSOIRS

(d'après « Design of Small Dams », publié par le Bureau of Reclamation,
US Department of the Interior) [18]

Le débit d'un déversoir en mince paroi (voir Fig. 10) est :

$$Q = CLH^{3/2}$$

Q = débit (m³/s)

L = longueur en crête (m)

H = hauteur de la lame déversante (m)

C = coefficient de débit, égal à 1,8 m^{1/2}s⁻¹

Cette relation reste valable pour le seuil circulaire d'un déversoir en puits (voir Fig. 10) tant que la lame reste libre, sans mettre la conduite en charge. Dans ce cas, L est la circonférence du puits, égale à $2\pi R$ (R rayon intérieur). La formule ci-dessus reste valable tant que $H/R \leq 0,45$.

Si $H/R > 0,45$, on prend cette même expression de Q mais en modifiant la valeur de C :

H/R	C (m ^{1/2} s ⁻¹)
0,45	1,8
0,70	1,6
1,0	1,1
1,3	0,9

Il est préférable d'éviter la condition $H > 0,45$, compte tenu des coups de bélier qui en résultent dans le puits, avec risque de déplacement des anneaux.

HYDRAULICS OF SPILLWAYS

(Summarized from U.S. Dept. Interior, Bureau of Reclamation,
 “ Design of Small Dams ”) [18]

The quantity of discharge over a sharp crested weir such as that illustrated in Fig. 10 is given by

$$Q = CLH^{3/2}$$

where

- Q is the discharge in volume of water per unit time;
- L is the length of the crest;
- H is the head of water above the crest; and
- C is a discharge coefficient equal to $1,8 \text{ m}^{1/2}\text{s}^{-1}$

The same expression applies to a circular shaft spillway such as that illustrated in Fig. 10, provided the overflowing water can fall freely down the shaft without converging to form a single jet down the shaft axis. In this case L becomes the perimeter of the shaft, $2 \pi R$, where R is the inside radius. The above condition applies providing the ratio H/R does not exceed 0,45.

If H/R exceeds 0,45 the same formula for Q can be used, but the value of C must be modified as follows:

H/R	C ($\text{m}^{1/2}\text{s}^{-1}$)
0,45	1,8
0,70	1,6
1,0	1,1
1,3	0,9

The situation where H/R exceeds 0,45 should be avoided as it leads to pressure surges in the penstock shaft that may result in dislodgement of rings.

DIMENSIONNEMENT DES PUIITS ET DES CONDUITES DE DÉCANTATION SOUS REMBLAI

1. Dimensionnement des cylindres ou conduites soumis à des pressions externes

Les puits et conduites étant vides la plupart du temps, le premier cas de charge à étudier concerne la pression externe appliquée par les résidus. La pression latérale appliquée au puits, à la profondeur H au-dessous de la surface des résidus et h au-dessous de la ligne de saturation, s'écrit (voir 3.2.2 ci-dessus et Fig. 11) :

$$\text{Pour } h < H \quad \sigma_h = 0,6 (\gamma H - \gamma_w h) + \gamma_w h$$

$$\text{Pour } h \geq H \quad \sigma_h = 0,6 \gamma' H + \gamma_w h$$

γ : densité des résidus saturés

γ_w : densité de l'eau

γ' : densité immergée des résidus ($\gamma - \gamma_w$).

La pression externe provoquant l'écrasement d'un cylindre vide est égale à (voir Fig. 15 a) :

$$\sigma_{\text{crit.}} = \frac{8E}{3} \cdot \frac{t^3}{D^3}$$

E : module de Young du matériau du tuyau

t : épaisseur de la paroi du tuyau

D : diamètre du tuyau

Compte tenu du coefficient de sécurité, la valeur de σ_h à un niveau quelconque ne doit pas dépasser le tiers de $\sigma_{\text{crit.}}$.

Dans l'expression de $\sigma_{\text{crit.}}$, les valeurs de t et de E d'un tuyau en béton armé sont prises égales à celles du béton seul, la présence des armatures n'étant pas prise en compte.

Les conduites posées à la surface du terrain naturel sont dimensionnées en fonction de la contrainte totale appliquée par les résidus, c'est-à-dire qu'au niveau H, la pression externe appliquée au tuyau est prise égale à la plus grande des deux valeurs : $\sigma = \gamma H + \gamma_w (h - H)$ ou $\sigma = \gamma H$.

Compte tenu du coefficient de sécurité, σ ne doit dépasser le tiers de $\sigma_{\text{crit.}}$

2. Réduction de la pression résultant de la pose de la conduite en tranchée

La pose de la conduite en tranchée a pour conséquence une réduction de la pression externe appliquée sur la conduite (voir 3.2.2 ci-dessus), une partie de la

STRUCTURAL DESIGN OF DECANT PENSTOCK TOWERS AND OUTFALLS

1. Design of cylinders or pipes subjected to external pressure

Penstock towers and outfalls are empty for most of their working life and the primary design loading which they must resist is the external pressure exerted by the residue. As explained in Section 3.2.2 and Fig. 11, the lateral pressure on a penstock tower at depth H below the surface of the residue and depth h below the seepage surface is by :

$$\sigma_h = 0,6 (\gamma H - \gamma_w h) + \gamma_w h \quad \text{for } h < H$$

$$\text{or } \sigma_h = 0,6 \gamma' H + \gamma_w h \quad \text{for } h \geq H$$

in which γ is the saturated density of the residue, γ_w is the density of water and γ' ($= \gamma - \gamma_w$) is the submerged density of the residue.

The external pressure that will cause an empty cylinder to collapse is given by (see Fig. 15 a):

$$\sigma (\text{critical}) = \frac{8E}{3} \cdot \frac{t^3}{D^3}$$

in which E is Young's modulus for the material of the pipe walls, t is the wall thickness and D the diameter of the pipe.

For a safe design, σ_h at any depth should not exceed 1/3 of the corresponding value for σ (critical).

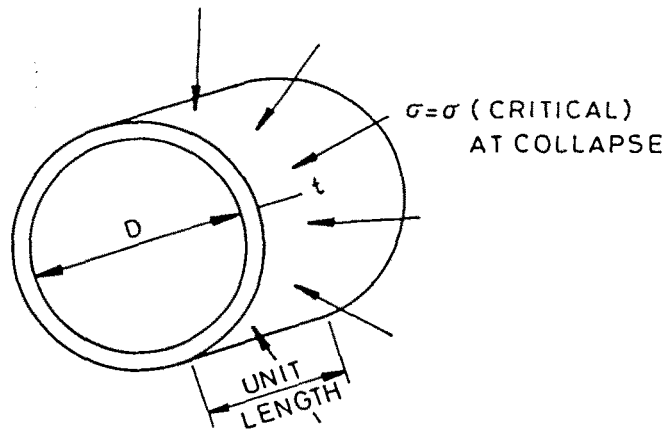
In the expression for σ (critical), t and E for a reinforced concrete pipe should be taken as the values for the concrete only, i.e. the presence of the reinforcing should be ignored.

Penstock outfalls bedded at the original ground surface should be designed to withstand the total overburden stress exerted by the residue, i.e. at depth H, the external pressure on the pipe will be the greater of $\sigma = \gamma H + \gamma_w (h - H)$ or $\sigma = \gamma H$.

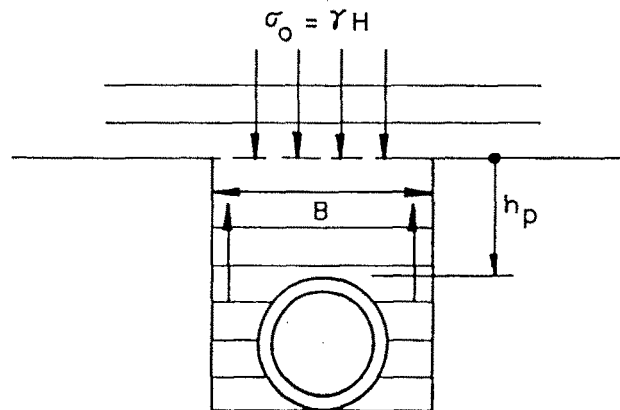
For a safe design σ should not exceed 1/3 of σ (critical).

2. Pressure relieving effect of bedding a pipe in a trench

As explained in Section 3.2.2, the effect of bedding the outfall pipe in a trench is to relieve the external pressure on the pipe, as part of the overburden load is



(a) EXTERNAL PRESSURE ON AN EMPTY CYLINDER



(b) PRESSURE RELIEF BY BEDDING PIPE IN A TRENCH

charge étant reportée par cisaillement sur les parois de la tranchée. L'axe de la conduite étant situé à une profondeur h_p au-dessous du niveau du terrain naturel, lui-même situé à une profondeur H au-dessous de la surface des résidus (voir Fig. 15 b), la conduite est dimensionnée pour résister à la pression suivante :

$$\sigma = \gamma \cdot H \cdot e^{-1,2 \operatorname{tg} \phi' \cdot \frac{h_p}{B}}$$

γ : densité des résidus saturés; B : largeur de la tranchée.

Fig. 15

(a) External pressure on an empty cylinder

(a) *Pression externe appliquée sur un cylindre vide*

$\sigma = \sigma$ (critical) at collapse
Unit length

$\sigma = \sigma_{crit.}$ à la rupture
Longueur unitaire

(b) Pressure relief by bedding pipe in a trench

Réduction de la pression par pose de la conduite en tranchée

carried by shear stresses on the sides of the trench. If the centreline of the pipe is at depth h_p below the general ground surface which in turn is at depth H below the surface of the residue (see Fig. 15 b), the pipe should be designed for an external pressure of :

$$\sigma = \gamma \cdot H \cdot e^{-1.2 \tan \phi' \cdot \frac{h_p}{B}}$$

in which γ is the saturated density of the residue, B is width of trench.

e.g. if $\phi' = 35^\circ$ and

$\frac{h_p}{B} = 0,5$	$\sigma = 0,66 \gamma H$
$\frac{h_p}{B} = 1,0$	$\sigma = 0,43 \gamma H$
$\frac{h_p}{B} = 1,5$	$\sigma = 0,28 \gamma H$
$\frac{h_p}{B} = 2,0$	$\sigma = 0,19 \gamma H$

It is obvious from the above examples that bedding the outfall pipe in a trench has considerable benefits.

3. Downdrag on the shaft of a decant penstock

The frictional downdrag exerted on the shaft of a penstock as the residue settles around it is (at depth H below the residue surface and depth h below the seepage surface) given by (see Fig. 11) :

$$Q = 0,6 P \cdot \tan \phi' \cdot H \left(\gamma \frac{H}{2} - \gamma_w h \right) \quad \text{for } h < H$$

$$Q = 0,6 P \cdot \tan \phi' \cdot \gamma' \frac{H^2}{2} \quad \text{for } h \geq H$$

in which P is the perimeter of the shaft.

e.g. for $h < H$, if $\phi' = 35^\circ$ $H = 30$ m, $h = 20$ m
 $\gamma = 17$ kNm⁻³ $\gamma_w = 10$ kNm⁻³

$$Q = 693 \text{ kN per m of perimeter.}$$

For a shaft wall thickness of 100 mm this corresponds to a compressive wall stress of 6,9 MPa which would rise to 32 MPa if the seepage surface were to fall until $h = 0$.

Imprimerie de Montlignon
61400 La Chapelle Montlignon
Dépôt légal : avril 1995
N° 17148
ISSN 0534-8293
Couverture : Olivier Magna

Copyright © ICOLD - CIGB

Archives informatisées en ligne  *Computerized Archives on line*

***The General Secretary / Le Secrétaire Général :
André Bergeret - 2004***



**International Commission on Large Dams
Commission Internationale des Grands Barrages
151 Bd Haussmann -PARIS -75008**
<http://www.icold-cigb.net> ; <http://www.icold-cigb.org>