



Les petits barrages de décrue en Mauritanie

Recommandations pour la conception et la construction



Ouvrer pour que les populations rurales pauvres se libèrent de la pauvreté

Les petits barrages de décrue en Mauritanie

Recommandations pour la conception et la construction



Ouvrer pour que les populations rurales pauvres se libèrent de la pauvreté

Le FIDA remercie la Direction du développement et de la coopération de la Confédération suisse pour la subvention attribuée, sans laquelle la production de ce manuel n'aurait pas été possible. Nous remercions aussi l'auteur Jean-Maurice Durand, conseiller technique du Ministère français des Affaires Étrangères, détaché auprès de la Division des Politiques opérationnelles et Conseil technique du FIDA, ainsi que tous ceux qui ont participé à sa publication.

Ce manuel a bénéficié d'une relecture effectuée par:

- M. Merzouk Abdelaziz, chargé de programme
- Melle Audrey Nepveu de Villemarceau, conseillère technique
- M. Jacques de Boissezon, Expert
- M. Dario Tricoli, Expert

Les illustrations et photos ont été réalisées par M. Jean-Maurice Durand.

© 2012 Fonds international de développement agricole (FIDA)

Les appellations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part du Fonds international de développement agricole des Nations Unies aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites. Les appellations de pays "développés" et "en développement" sont employées à des fins de commodité statistique et ne reflètent pas nécessairement un jugement quant au stade atteint par tel ou tel pays ou telle ou telle région dans le processus de développement.

La présente publication peut être reproduite en tout ou en partie sans l'autorisation préalable du FIDA, à condition que la source soit indiquée par l'éditeur et qu'une copie du texte publié soit envoyée au FIDA.

Page de couverture: © Jean-Maurice Durand

ISBN 978-978-92-9072-328-8

Juillet 2012

Table des matières

Avant-propos	4
1 Présentation générale des barrages de culture de décrue en Mauritanie	5
2 Première étape du processus de conception: le choix d'un site de barrage de décrue	7
Caractérisation préliminaire d'un site potentiel de barrage à partir de critères simples	7
Conditions topographiques et morpho-pédologiques de réussite de la culture de décrue en amont d'un barrage	8
Faisabilité technique du barrage	10
Possibilité de valoriser l'aval du barrage: critères supplémentaires susceptibles d'être pris en compte dans le choix d'un site	12
Conditions sociales et économiques favorables à la réussite du projet	17
3 Conception et réalisation des barrages en remblai	18
Géométrie et compactage des remblais	18
Traitement de la fondation	21
Drains	22
Protection des talus et de la crête	23
4 Ouvrages hydrauliques incorporés dans un barrage en remblai	26
Évacuateurs de crue	26
Dissipateurs d'énergie	32
Ouvrages de vidange	33
Échelles limnimétriques	37
5 Autres types de barrages	38
Barrages en enrochements	38
Barrages en béton ou en maçonnerie de moellons	38
Barrages de types particuliers	39
Bibliographie	40

Avant-propos

La gestion durable des ressources en eau face aux demandes pressantes d'une population toujours croissante est sans aucun doute l'un des défis majeurs auquel l'humanité sera confrontée au cours de ce nouveau millénaire. Les besoins sont multiples et la ressource limitée. Dans les pays arides et semi-arides, cette situation est encore plus préoccupante compte tenu des aléas climatiques. Dans ces régions, il est vital de maîtriser plus particulièrement les eaux de surface qui conditionnent bien souvent la réussite des projets agricoles.

Au cours des trente dernières années, de nombreux gouvernements et institutions internationales et spécialisées, ont mis en œuvre de vastes programmes et projets visant à favoriser la conservation, la mobilisation et la valorisation des ressources en eau. En Mauritanie et dans beaucoup d'autres pays marqués par la sécheresse, les petits barrages constituent une des solutions promues dans le but de répondre aux besoins des agriculteurs, des pasteurs et, plus généralement des ménages ruraux. La culture de décrue en amont des barrages est l'un des modes d'utilisation possibles de la précieuse ressource.

La conception et la réalisation des ouvrages conformément aux règles de l'art sont des gages de leur durabilité, de leur efficacité et, par là-même, de l'atteinte des objectifs pour lesquels ils ont été réalisés. A cet égard, force est de constater que de nombreux petits barrages construits dans les régions soudano-sahéliennes l'ont été selon des techniques éprouvées et témoignent de l'expérience riche et diversifiée de leurs concepteurs. Toutefois, un certain nombre de problèmes peuvent être observés de manière récurrente sur ces ouvrages. Ils relèvent de défauts de conception ou de construction et peuvent parfois entraîner de graves dégâts allant jusqu'à la destruction complète de tout ou partie du barrage. Il est donc utile de rappeler les principales règles conceptuelles et dispositions constructives relatives aux petits barrages, en tenant compte des contraintes propres aux régions sèches. Ce manuel est un complément au "Manuel de suivi et d'entretien des petits barrages en Mauritanie" publié dans la même série.

Pour le FIDA, l'accès sécurisé à l'eau des populations rurales pauvres est essentiel pour atteindre les Objectifs du Millénaire pour le Développement, et en particulier l'objectif de réduire de moitié la proportion de personnes vivant dans la pauvreté extrême et la faim d'ici à 2015. Dans cette perspective, la Division des Politiques opérationnelles et Conseil technique du Fonds, en collaboration avec la Division Afrique de l'Ouest et du Centre, publie ce manuel à destination des concepteurs de petits barrages. Sur la base des pratiques, de l'expérience et des réflexions de nombreux professionnels, il rappelle les principales règles de l'art relatives à la réalisation de petits barrages dans le contexte mauritanien. Cependant, les recommandations qu'il contient peuvent être étendues et utilisées dans d'autres pays aux caractéristiques géographiques similaires.

Nous formons ainsi le vœu que cet ouvrage soit utile à tous les acteurs concernés par les questions de conception et de construction de petits barrages, mais aussi, au-delà, les associations, groupements et collectivités rurales qui sont en charge de leur gestion. Nous souhaitons également qu'en contribuant ainsi à la durabilité des ouvrages réalisés dans le cadre des projets mis en œuvre conjointement avec les Gouvernements et les bénéficiaires, nous tendrons un peu plus vers la réalisation de nos objectifs d'accroissement de la sécurité alimentaire et de réduction de la pauvreté, en Mauritanie et dans bien d'autres pays où nous intervenons avec nos partenaires.

Adolfo Brizzi
Directeur
Division des Politiques opérationnelles
et Conseil technique

Ides de Willebois
Directeur
Division Afrique de l'ouest et du centre

1. Présentation générale des barrages de culture de décrue en Mauritanie

Dans les régions sahéliennes de Mauritanie, les précipitations moyennes sont comprises entre 200 et 400 millimètres par an. Ces faibles pluies ainsi que leur irrégularité rendent très aléatoire toute culture céréalière. Face à ces difficultés climatiques, les populations érigent depuis fort longtemps des levées de terre non compactées et dépourvues de tout ouvrage annexe sophistiqué. Ces barrages rudimentaires sont maintenus en eau quelques semaines, ce qui permet d'humecter jusqu'à saturation les terres situées en amont et d'alimenter les nappes superficielles. La vidange intervient en fin d'hivernage, par simple ouverture d'une brèche dans le remblai. La plupart de ces barrages rudimentaires sont toutefois voués à une destruction plus ou moins rapide (3 ou 4 ans voire moins) car ils ne possèdent pas d'évacuateur de crue.

La culture de décrue contrôlée représente un potentiel d'environ 40 000 hectares de terres cultivables, ce qui correspond à une fourchette comprise entre 10% et 30% de la superficie cultivée à l'échelle nationale chaque année. La culture habituellement pratiquée est le sorgho, mais le mil, le niébé, la pastèque et le maïs sont également cultivés avec succès. Ce système cultural peut donc jouer un rôle de premier plan dans la stratégie de sécurité alimentaire en Mauritanie.

Ces observations ayant été faites dès l'époque coloniale, le Génie rural s'est préoccupé très tôt de concevoir et de construire, conformément aux règles de l'art établies dans ce domaine, des barrages de décrue plus sophistiqués prévoyant notamment un compactage des remblais, des ouvrages de vidanges et des évacuateurs de crue. Certains de ces barrages ont été réalisés dès les années 50. Une vague importante de constructions a eu lieu également entre 1970 et 1990, la plupart des travaux étant alors effectués en régie par des brigades de l'administration. Depuis le début des années 90, les travaux réalisés par des entreprises à la suite d'appels d'offres se sont largement développés.

Le principe des ouvrages ainsi réalisés reste le même que pour les anciens barrages rudimentaires: la cuvette en amont permet de stocker l'eau de ruissellement pendant une durée de 2 à 4 mois. Elle est ensuite vidangée grâce au dispositif conçu à cet effet dans la partie centrale du barrage. Les surfaces exondées sont alors mises en culture, de façon à ce que les plantes profitent au mieux de la réserve d'eau stockée dans le sol. L'objectif de ces aménagements est donc de pouvoir inonder la plus grande surface possible (en pratique, de quelques dizaines d'hectares à plus de 1 000 hectares).

Sur le plan constructif, la qualité des barrages de décrue en Mauritanie est extrêmement variable. Malgré la diversité des concepteurs et des constructeurs au fil des décennies, l'éventail des choix techniques est resté relativement restreint. La plupart des barrages de décrue mauritaniens sont constitués d'un remblai dépassant rarement 4 mètres de hauteur mais pouvant atteindre des longueurs importantes (1 kilomètre et plus), étant donné la topographie souvent très peu marquée. Les déversoirs, généralement à entonnement frontal, et les vidanges sont des ouvrages en béton, parfois en gabions (de facture locale ou importés). Il existe quelques cas de barrages en maçonnerie de moellons (dans le Guidimakha, par exemple).

Plusieurs concepts ont ainsi fait école, si bien que les ouvrages présentent souvent les mêmes défauts. De nombreux diagnostics, effectués sur des barrages en service ou rompus, ont montré qu'ils présentaient souvent un certain nombre de points faibles:

- qualité du compactage médiocre ou incertaine;
- liaisons remblai-béton mal assurées;
- études géotechniques peu poussées;
- construction des ouvrages en gabions non conforme aux règles de l'art;
- mauvais positionnement des évacuateurs de crue; et
- dispositifs de protection insuffisants.

Le FIDA étant appelé à soutenir des projets qui prévoient la réalisation de nouveaux barrages de décrue, il n'est donc pas inutile de rappeler les principes de conception et de construction de ce type d'ouvrage. La portée du présent document est toutefois limitée (i) à une analyse des problèmes les plus souvent rencontrés en Mauritanie et (ii) à la proposition de prescriptions techniques adaptées à ce contexte particulier. Les méthodes de calcul et de dimensionnement ne sont pas abordées et nous renvoyons à cet égard le lecteur à des manuels spécialisés beaucoup plus complets tels que celui cité en référence [8].

2. Première étape du processus de conception: le choix d'un site de barrage de décrue

Le choix d'un site de barrage est étroitement lié à la faisabilité du projet. Il est, par nature, multicritères car l'ouvrage doit être à la fois constructible, durable, utilisable efficacement et bénéfique sur le plan socio-économique.

Le choix définitif d'un site doit donc tenir compte de tout un ensemble de paramètres techniques, environnementaux et humains. En Mauritanie, il est souvent guidé par les vœux des futurs exploitants, qui ont parfois, d'ailleurs, réalisé déjà une ou plusieurs digues traditionnelles à l'endroit proposé. Il convient donc d'examiner attentivement ces ouvrages ainsi que leurs abords car il se révèle souvent opportun de placer un nouvel aménagement à l'endroit même où l'ouvrage sommaire existait. Cette approche présente un certain nombre d'avantages. En premier lieu, on peut penser que les agriculteurs ont choisi le site en question car il représente un "optimum géographique" à leurs yeux. En outre, le fait d'avoir tenté un aménagement dénote une certaine volonté de mise en valeur de la zone et témoigne d'une cohésion sociale existante.

Le technicien doit donc examiner attentivement la possibilité d'implanter un ouvrage plus sophistiqué à l'endroit choisi. Cependant, il lui faut également s'assurer non seulement de la faisabilité technique du projet, mais aussi de son intérêt économique et social par rapport à l'investissement envisagé.

L'analyse multicritères conduisant au choix d'un site de barrage de décrue peut donc comporter trois critères principaux:

- (a) l'aptitude de la cuvette du barrage à la conduite de cultures de décrue (et les éventuelles possibilités pour valoriser l'aval);
- (b) la faisabilité technique du barrage; et
- (c) les conditions sociales et économiques favorables à la réussite du projet.

À l'évidence, il est rare de trouver un site qui maximise l'ensemble des critères.

Caractérisation préliminaire d'un site potentiel de barrage à partir de critères simples

Un premier aperçu de la faisabilité d'un barrage de culture de décrue peut être obtenu après une première analyse rapide comprenant au moins les étapes suivantes:

- (a) détermination sur carte topographique de la taille du bassin versant, estimation grossière des apports et des crues prévisibles;
- (b) mesure de la surface de la cuvette pouvant être mise en culture et des surfaces pouvant être valorisées par les eaux de vidange en aval;
- (c) allure topographique du site: les courbes de niveau doivent délimiter une cuvette fermée, l'axe du barrage doit pouvoir être positionné dans la partie la plus resserrée de la vallée (plusieurs positions sont toutefois à étudier: un site topographiquement favorable n'est pas forcément à retenir d'un point de vue géotechnique par exemple);
- (d) présence ou non d'un verrou rocheux;
- (e) présence de zones d'emprunt pour la construction du remblai;
- (f) pédologie de la cuvette favorable à la culture de décrue;
- (g) premier aperçu des contraintes anthropologiques (contraintes foncières, éloignement du site, présence de pistes, organisation sociale des bénéficiaires, etc.); et
- (h) estimation sommaire du coût de l'ouvrage et comparaison des différentes options.

Lorsqu'un site réunissant un maximum de ces critères a été identifié, on passe à l'étape suivante qui consiste à mener des études préliminaires en matière de pédologie, de topographie, d'hydrologie et de géotechnique. En parallèle, il convient d'approfondir également les questions socio-économiques et de s'assurer que les bénéficiaires puissent jouir de la meilleure sécurité foncière possible. Les études préliminaires ont ainsi pour objet de lever les incertitudes d'ordre technique et sociologique et de fournir les données de base nécessaires à la conception du projet. À l'issue de celles-ci, le concepteur se prononce sur la faisabilité technique de l'opération.

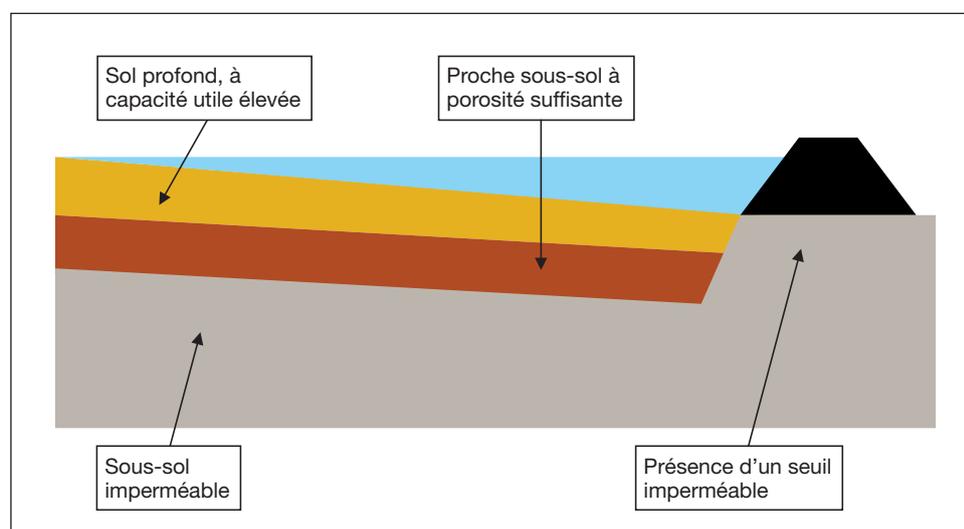
Conditions topographiques et morpho-pédologiques de réussite de la culture de décrue en amont d'un barrage

Dans les régions semi-arides de Mauritanie, la culture des céréales est généralement impossible sans apport d'eau supplémentaire, lorsque la pluviométrie n'atteint pas 350 à 450 millimètres au cours de l'hivernage.

La pratique culturale qui consiste à semer dans une terre préalablement inondée est donc bien adaptée à ce contexte climatique. Cependant, elle n'est envisageable que si le sol peut restituer aux plantes les quantités d'eau qui leur sont nécessaires. Or, la capacité utile des sols est généralement inférieure à 100 millimètres, même pour des plantes à enracinement profond. Il faut donc que les 250 à 350 millimètres manquants soient stockés dans le proche sous-sol et puissent remonter vers la surface par capillarité ou grâce à une nappe phréatique sous-jacente qui serait en charge. Pour une culture à cycle long (120 à 150 jours), il faut compter un débit de 2 à 3 mm/jour. Les observations effectuées sur de nombreux barrages ont permis d'identifier les conditions pédologiques et géologiques suivantes comme étant favorables à l'installation d'un barrage de décrue (figure 1):

- un sol profond présentant une capacité utile élevée;
- un horizon imperméable en sous-sol, qui évite l'infiltration profonde des eaux;
- un seuil rocheux imperméable, qui limite l'écoulement de la nappe phréatique vers l'aval, sur lequel le barrage sera de préférence positionné si les autres conditions sont favorables;
- une épaisseur d'alluvions suffisante pour emmagasiner la quantité d'eau nécessaire;
- une granulométrie des alluvions propice à une forte remontée capillaire (ce qui est notamment le cas lorsqu'ils sont constitués d'un mélange de sédiments fluviaux et éoliens); et

Figure 1
Coupe morpho-pédologique adaptée à l'implantation d'un barrage de culture de décrue



- des sols qui favorisent l'infiltration des eaux de pluie dans le bassin versant et donc la mise en charge de la nappe phréatique sous les alluvions.

L'expérience montre que lorsque ces critères sont réunis, le site est favorable à la culture de décrue et la cuvette est bien mise en valeur. En revanche, sur les sites où ces conditions ne sont pas vérifiées, la culture de décrue se révèle le plus souvent difficile et peu productive, voire parfois impossible. Pendant l'étude de faisabilité du barrage, il est donc essentiel de réaliser un diagnostic pédologique de la future cuvette, non seulement en effectuant une prospection de surface, mais aussi en creusant quelques fosses pédologiques.

Il est à noter également que les acquis de la recherche agronomique en matière de culture de décrue montrent que l'obtention de bons rendements dépend aussi de quelques règles très simples: travail du sol avant la crue, date du semis, démariage¹, désherbage, durée bien maîtrisée de la submersion.

Sur le plan topographique, il convient de rechercher une vallée dont les courbes topographiques sont fermées, afin d'éviter que la présence de cols latéraux de cote inférieure à celle du plan d'eau normal prévu n'empêche le remplissage (dans le cas contraire, de tels cols peuvent servir de déversoirs secondaires). Le principe, pour un barrage de décrue, est de rechercher un site permettant d'inonder la plus grande surface possible de terres (présentant les caractéristiques morfo-pédologiques appropriées évoquées précédemment) derrière le plus petit barrage possible.

Le site idéal, du point de vue topographique, est donc une large vallée qui se rétrécit brusquement et présente des flancs relativement escarpés là où sera construit le barrage. Un premier repérage peut être réalisé sur des cartes topographiques à une échelle assez petite (1/200 000^e par exemple), une visite de terrain restant néanmoins indispensable. Si ce premier aperçu est favorable, il faut évidemment procéder ensuite à un lever topographique plus précis. La cuvette doit être cartographiée, au moins jusqu'à la cote des plus hautes eaux, l'échelle étant fonction de la superficie, généralement comprise entre 1/2 500^e et 1/1 000^e, grandeurs bien adaptées aux petits barrages de décrue. La zone d'implantation du barrage doit être levée à plus grande échelle (1/500^e ou plus si besoin), sans oublier d'englober aussi une partie de l'aval afin de disposer des données topographiques nécessaires au calcul des ouvrages hydrauliques. Pour le choix de l'équidistance des courbes de niveau, on peut s'inspirer des valeurs proposées dans le tableau 1 suivant:

Tableau 1: Proposition d'équidistance des courbes de niveau

Allure topographique du terrain	Échelle		
	Supérieure à 1/1000 ^e	Entre 1/1000 ^e et 1/10000 ^e	Inférieure à 1/10000 ^e
Terrain plat	0,15 à 0,3 m	0,3 à 0,6 m	0,6 à 3 m
Terrain en pente douce	0,3 à 0,6 m	0,6 à 1,5 m	1,5 à 3 m
Terrain accidenté	0,6 à 1,5 m	1,5 à 3 m	3 à 6 m

Les plans topographiques ainsi obtenus permettent d'établir les courbes hauteur-volume et hauteur-surface de la cuvette. Ils servent en outre à calculer le volume des ouvrages selon différentes hypothèses de hauteur, de position et de surface cultivable en amont.

¹ Élimination des plants excédentaires.

Faisabilité technique du barrage

Étude hydrologique

Du point de vue de la faisabilité, l'étude hydrologique à entreprendre pour la conception d'un petit barrage de culture de décrue vise à répondre à deux questions:

- La cuvette se remplira-t-elle pratiquement chaque année afin de sécuriser la campagne agricole?
- Quel est le débit de crue contre lequel il convient raisonnablement de protéger le barrage pour éviter qu'il ne surverse et subisse de graves dommages (ce qui revient à calculer le débit maximal de fonctionnement du système d'évacuation des crues)?

Le présent document n'est pas censé rappeler les méthodes de calcul utilisées, pour lesquelles on se reportera à la littérature spécialisée, notamment à la référence [2].

Toutefois, il est utile de rappeler quelques points importants:

- L'incertitude hydrologique reste grande en Mauritanie car on dispose de peu de données pour appliquer les méthodes de calcul classiques (rappelons que pour la mise au point de la méthode Rodier-Auvray, seulement un ou deux bassins versants expérimentaux ont été étudiés en Mauritanie).
- De nombreuses ruptures de barrages ont eu pour origine des surverses, d'où l'importance de ne pas sous-dimensionner les ouvrages évacuateurs de crues. Le problème est que l'adoption de coefficients de sécurité élevés conduit généralement à un dimensionnement exagéré de l'évacuateur de crue, ce qui augmente considérablement le coût du barrage. Il convient naturellement de s'efforcer de prendre en compte l'effet de laminage, ce qui permet de calculer la longueur déversante au plus juste. Toutefois, la prudence reste de mise. Des cas de crues longues et caractérisées par un hydrogramme aplati, avec des volumes élevés qui se laminent mal, ne sont pas à exclure. En outre, la sédimentation de la cuvette au fil du temps peut entraîner une diminution sensible de l'effet de laminage. Une solution acceptable consiste à prévoir deux évacuateurs:
 - un primaire, situé au sein de l'ouvrage et destiné à évacuer les crues les plus fréquentes (durée de retour de dix ou vingt ans), calculé sur la base d'un compromis résultant d'une évaluation prudente de l'effet de laminage et d'une prise en compte raisonnable des incertitudes hydrologiques; et
 - un secondaire, réalisé en aménageant sommairement un col naturel en bordure de cuvette pour évacuer pendant les épisodes les plus rares. Cependant, la configuration topographique ne s'y prête pas toujours.

Études géologiques et géotechniques

Étant donné la catégorie à laquelle se rattachent les petits barrages de décrue, il n'est pas utile de prévoir des études géologiques proprement dites. En revanche, quelques études géotechniques sont indispensables, tant pour se prononcer sur la faisabilité des ouvrages que pour garantir leur pérennité. Bien entendu, la portée et le contenu de ces études doivent être adaptés à la taille et à l'importance réelle de l'ouvrage. Rappelons, en outre, qu'en cas de contexte géotechnique défavorable, il est généralement préférable de ne pas réaliser de barrage. En effet, soit le surcoût nécessaire pour le réaliser dans des conditions de sécurité acceptables est rédhibitoire, soit, si l'on passe outre, le risque de dommages est très important et peut se révéler parfois fatal à l'ouvrage.

Reconnaitances et essais sur site

Les essais de mécanique des sols à réaliser sur le terrain visent principalement à vérifier certains paramètres mécaniques et hydrauliques des matériaux en place, en particulier de la

fondation. Les remblais étant constitués de matériaux remaniés, les essais en laboratoire sont plus appropriés.

Dans le cas des petits barrages de culture de décrue en Mauritanie, les tests les plus utiles sont:

- les essais de perméabilité de type "essais Lefranc" (essai simple, tant pour le matériel que pour l'interprétation des résultats, consistant à injecter de l'eau dans plusieurs couches de sol et à mesurer le volume d'eau absorbé sous une charge hydraulique donnée); et
- les tests au pénétromètre qui permettent de s'assurer de l'homogénéité de la fondation, en complément des autres investigations.

Soulignons également l'importance d'effectuer une reconnaissance visuelle de la fondation en creusant des puits de reconnaissance dans l'axe du futur barrage. Espacés de 25 à 50 mètres, suivant l'hétérogénéité constatée, ils doivent être creusés jusqu'à une profondeur à peu près équivalente à la hauteur prévisible de l'ouvrage dans la partie centrale (l'espacement des puits augmentera et leur profondeur diminuera au fur et à mesure que l'on s'éloignera du lit mineur). Ce type de reconnaissance permet de repérer des singularités telles que les lentilles de sable ou les argiles à canaux, qui peuvent être très préjudiciables à la bonne tenue des ouvrages.

Essais en laboratoire

Rappelons très brièvement les essais les plus classiques réalisés en laboratoire de mécanique des sols sur des échantillons prélevés sur le terrain:

- a) **Les essais d'identification:** teneur en eau naturelle, granulométrie et sédimentométrie, limites d'Atterberg. Les essais de teneur en eau sont particulièrement importants, aussi bien pendant les études préliminaires que pendant la phase de construction du remblai. Ils conditionnent en effet la réussite des opérations de compactage dont dépendent la stabilité, l'étanchéité et la durabilité de l'ouvrage.
- b) **Les essais de compactage,** appelés "essai Proctor normal" et "essai Proctor modifié": ils permettent de déterminer les caractéristiques optimales (densité et teneur en eau) du matériau compacté avec une énergie donnée. Ces caractéristiques servent ensuite de référence sur le chantier de construction.
- c) **Les essais de perméabilité** (à l'œdomètre ou au perméamètre) sur matériau intact ou compacté après essai Proctor (gros ou petit moule): ils permettent de déterminer la perméabilité du matériau compacté ou du sol en place et donc de se prononcer sur son aptitude à remplir une fonction donnée (étanchéité, drainage, etc.) ou sur la nécessité d'ajouter une étanchéité complémentaire (noyau d'argile, géomembrane, etc.).
- d) **Les essais de consolidation à l'œdomètre:** ils ont pour but de mesurer les variations de volume d'un sol soumis à des contraintes de compression. On en tire généralement des prévisions de tassement d'un remblai. Ils présentent donc un intérêt limité dans le cas des barrages de faible hauteur (jusqu'à 5 mètres en partie centrale).
- e) **Les essais de cisaillement:** réalisés à l'aide de la boîte de Casagrande ou de l'appareil d'essai triaxial, ils permettent de déterminer les caractéristiques mécaniques au cisaillement, la cohésion et l'angle de frottement, utiles pour calculer la stabilité des talus.
- f) **Les essais de dispersivité des sols:** la dispersivité est un phénomène d'origine chimique souvent constaté dans le cas des loëss et de certaines argiles, qui a causé la rupture de nombreux barrages dans le monde et qui se traduit par une diminution

de la cohésion. Les sols affectés deviennent extrêmement érodables, l'érosion pouvant être superficielle et/ou interne. Dans le premier cas, qui peut survenir notamment lorsque l'on a employé un matériau dispersif sur un talus sans protection suffisante ou lorsque la couche de protection elle-même est constituée de matériau dispersif, on observe rapidement une érosion par griffures et/ou un ravinement. Le second cas entraîne un phénomène de suffusion², dont la forme ultime est la création d'un renard hydraulique³, souvent fatal à l'ouvrage. Ce phénomène ayant été souvent évoqué dans le cas des barrages en Mauritanie, il convient d'effectuer des essais appropriés – "*crumb test*", "*pinhole test*", double hydromètre ou essais chimiques (pour lesquels on se reportera à la littérature spécialisée) – et d'adapter en conséquence la conception des ouvrages dont l'ensemble ou une partie des matériaux envisagés se révèlent dispersifs. Il faut en particulier apporter un soin extrême à la conception des drains en respectant scrupuleusement les règles de filtre.

Possibilité de valoriser l'aval du barrage: critères supplémentaires susceptibles d'être pris en compte dans le choix d'un site

Nécessité et principe de la vidange

En Mauritanie, la pratique de la culture de décrue à l'amont d'un barrage impose une exondation totale des surfaces à mettre en culture. En effet, le stockage de l'eau a seulement pour but d'assurer le remplissage des réservoirs du sol et du sous-sol. Il est donc normal de vidanger les barrages dès que possible, lorsque la submersion est complète et les pores du sol saturés, afin d'ensemencer au plus tôt l'ensemble de la superficie exondée à cet effet. Dans des circonstances pluviométriques habituelles, les barrages se remplissent entre juillet et septembre. Vers le mois d'octobre, les apports se terminent; la vidange est alors possible. La totalité des eaux contenues dans la cuvette est donc évacuée vers l'aval par l'ouvrage de vidange. Dans la plupart des cas, la durée de cette opération est très courte. Si l'organe de vidange le permet, il arrive que les agriculteurs contrôlent le débit de manière à étaler le semis sur une période dont la durée correspond à la disponibilité de main d'œuvre (un mois environ).

Lorsque plusieurs barrages se succèdent dans un même bassin versant, leurs vidanges successives doivent être réfléchies et concertées. En effet, la vidange des retenues en amont peut contrarier l'organisation des opérations menées en aval. Il convient de choisir le moment, la durée et le débit de manière à tenir compte de cet élément. Ce raisonnement, à l'échelle d'un bassin versant, n'est toutefois guère facile à mettre en œuvre dans le contexte mauritanien.

Aménagement de l'aval du barrage et valorisation des eaux de vidange

Dans la plupart des cas, les eaux de vidange sont peu ou pas utilisées en aval du barrage, ce qui est plutôt étonnant dans un pays très aride. Pourtant, un certain nombre de solutions peuvent être envisagées pour tirer profit des eaux de vidanges et des terres situées en aval. La configuration de cette partie de la vallée et la qualité des sols en particulier doivent alors être prises en compte également dans le choix du site, même si ces facteurs ne sont vraisemblablement pas les plus déterminants.

² La suffusion est le processus par lequel les particules les plus fines du sol se détachent de la matrice solide et sont transportées par un écoulement interstitiel à travers les pores du milieu.

³ Le renard hydraulique est un phénomène d'érosion régressive interne au remblai ou à la fondation.

L'épandage traditionnel et ses améliorations possibles

Notons que l'on observe parfois une utilisation traditionnelle des eaux de vidange. Il s'agit généralement de faire bénéficier des champs de sorgho d'une submersion très temporaire. Ces tentatives ne semblent être faites que lorsque la pluviométrie est suffisante pour permettre le démarrage de la culture et lorsque les sols peuvent emmagasiner un complément d'eau significatif et le restituer après la submersion. Il s'agit donc d'une irrigation de submersion complémentaire très sommaire, pratiquée sur des cultures principalement alimentées par les pluies et le ruissellement d'hivernage. Elle a lieu à un moment où les cultures sont déjà bien avancées et peut donc constituer un facteur de réduction du risque hydrique.

Cet épandage traditionnel peut être amélioré par des dispositifs simples tels que les diguettes en terre, isohypses ou disposées transversalement au sens de l'écoulement. Celles-ci permettent de ralentir ce dernier et favorisent l'infiltration. Une solution plus sophistiquée consiste à construire une série de digues filtrantes qui permettent une meilleure pénétration de l'eau dans le sol tout en évitant que les éléments qui le constituent ne soient entraînés par le courant.

La valorisation traditionnelle des eaux de vidange ne se limite pas aux cultures céréalières. Elle peut aussi servir aux cultures fourragères ou aux plantations forestières. En particulier, lorsque le bassin est endoréique⁴, les eaux s'accumulent dans des dépressions fermées que l'on appelle "tamourts" ou "tachotts" en Mauritanie.

Cette récupération naturelle est exploitable car elle permet notamment de développer la production des espèces fourragères et arbustives. Le maraîchage est également possible en bordure de ces zones humides. La présence en aval d'une telle dépression peut orienter favorablement le choix d'un site compte tenu des potentialités qu'elle offre en matière de valorisation des eaux de vidange, mais le concepteur devra être attentif aux points suivants:

- Tamourts et tachotts ne doivent pas faire l'objet d'une exploitation intensive car ce sont généralement des milieux riches du point de vue de la biodiversité.
- Il faut éviter de les clôturer complètement et d'interdire ainsi leur accès aux éleveurs nomades qui y conduisent traditionnellement leurs troupeaux (photo 1).



Photo 1: Zone de pâturage inondable à l'aval du barrage de Mâl; l'utilisation de motopompes permet également d'irriguer de petites surfaces maraîchères

4 Un bassin versant est endoréique lorsque tous ses axes de drainage aboutissent à une dépression fermée.

La réalisation de mares surcreusées ou "boulis"

Il s'agit de capacités de rétention d'eau creusées dans le sol, dans des zones basses où, souvent, une mare naturelle existait déjà. La profondeur de ces ouvrages doit être suffisante pour que la période de stockage dure le plus longtemps possible, compte tenu des prélèvements et de l'évaporation (photo 2). L'eau contenue dans un bouli peut être utilisée jusque très tard en saison sèche pour le maraîchage ou l'abreuvement du bétail, mais il convient d'en proscrire l'usage pour l'alimentation en eau humaine: les risques sanitaires sont en effet très importants, ce type de réservoir étant un milieu clos dans lequel parasites et microbes peuvent proliférer.

Étant donné les conditions climatiques, une profondeur de 2,5 mètres semble être un minimum. Cependant, le bouli n'est pas forcément une simple excavation et il est possible de le réaliser de manière à limiter encore davantage l'évaporation, favoriser la végétalisation et empêcher l'envasement. La figure 2 schématise le principe d'un bouli où sont prévues les dispositions permettant d'atteindre ces objectifs: plantation d'arbres en périphérie, levée de terre limitant les effets du vent, et donc l'évaporation, et ouvrage de dérivation de l'eau permettant le piégeage du sable et de la boue.

Si l'on projette de réaliser une ou plusieurs mares surcreusées à l'aval d'un barrage, il convient d'effectuer quelques essais simples de reconnaissance in situ, afin de vérifier notamment la qualité et l'imperméabilité du terrain (cf. essais décrits page 11).

La mise en place d'un système simple d'irrigation gravitaire

Lorsque la cuvette du barrage est pleine, jusqu'à la vidange, une irrigation d'appoint de saison des pluies est possible en aval, pourvu que les conditions du sol conviennent à la mise en culture. Évidemment, le périmètre irrigué doit être conçu de manière à ne pas être détruit au cours de la vidange si les cultures sont encore présentes à ce moment-là. On peut également imaginer des systèmes mixtes associant successivement, pour une même superficie cultivée, une irrigation gravitaire puis une irrigation par motopompage à partir de boulis remplis à l'occasion de la vidange.



Photo 2: Vue aérienne d'un barrage de décrue à l'aval duquel on a réalisé un bouli pour récupérer par dérivation une partie des eaux de vidange. Il doit être implanté à quelques dizaines de mètres au moins en aval du barrage afin d'éviter de favoriser la remontée d'une nappe interne au remblai qui pourrait être préjudiciable à sa stabilité. En outre, cette distance est nécessaire pour permettre un contrôle aisé des fuites éventuelles au pied du talus aval du barrage

Le goutte-à-goutte pourrait être un système bien adapté car il consomme peu d'eau et permet de conserver un remplissage maximum afin que la cuvette en amont soit correctement humidifiée avant la vidange. Un organe de prise (de type prise de fond) pourrait donc être couplé à l'ouvrage de vidange (photo 3).

Figure 2
Schéma de principe d'un bouli (extrait de l'ouvrage *Eaux et terres en fuite* de Chlecq et Dupriez)

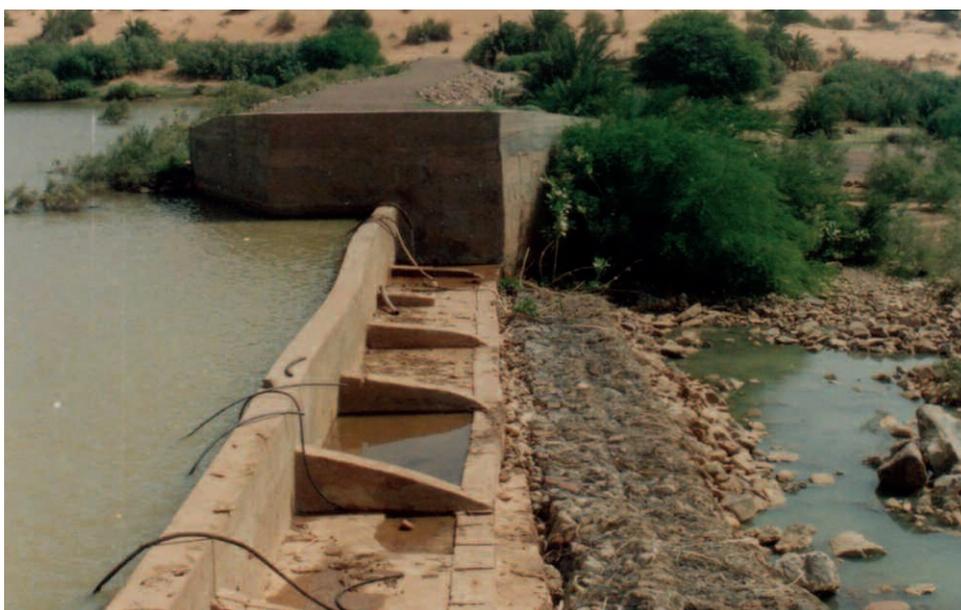
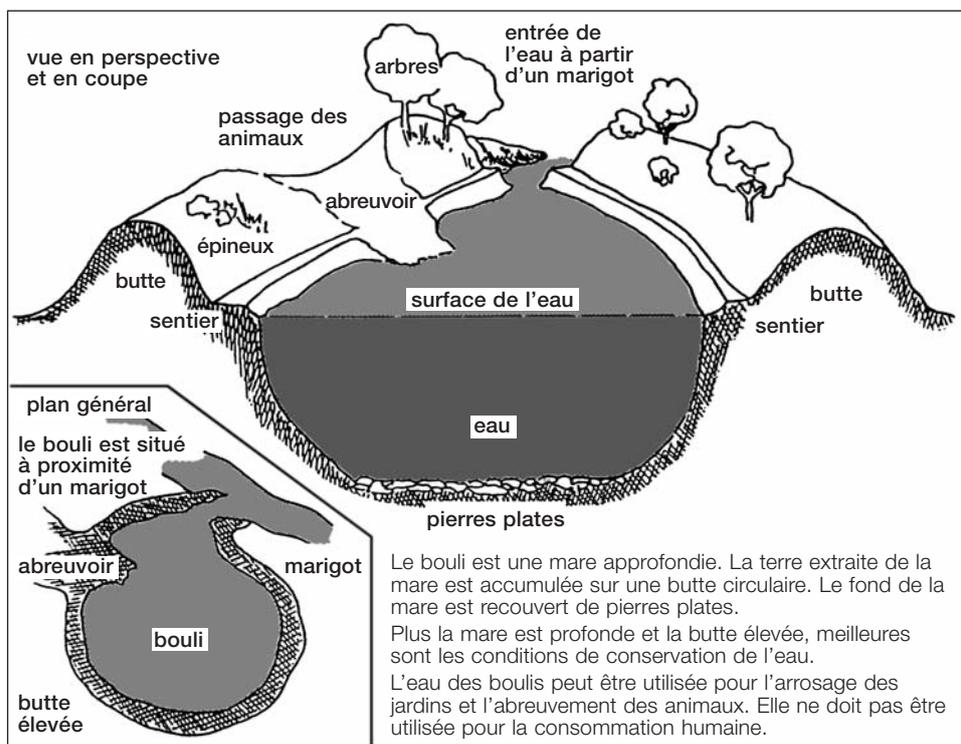


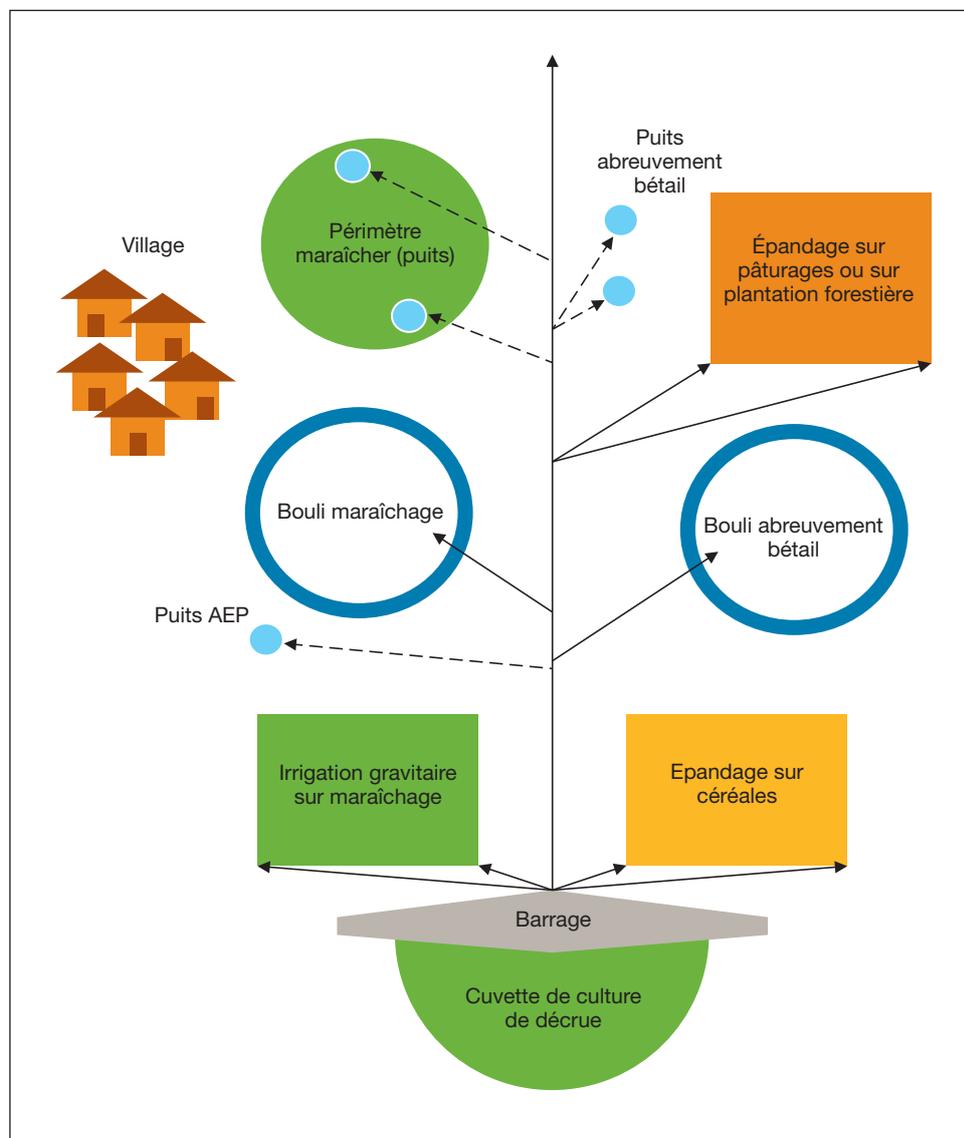
Photo 3: Barrage de Teyarett (Adrar). Prises d'eau rudimentaires par siphons (tuyaux simplement disposés par-dessus l'évacuateur de crues).

Notons également qu'une irrigation gravitaire simple peut également être réalisée à partir de prises par siphons, les plus simples étant constituées de tuyaux en plastique (système facile à utiliser; faible débit, mais possibilité de placer plusieurs tuyaux).

L'utilisation des eaux souterraines

Le stockage de l'eau en amont du barrage, bien que temporaire, peut contribuer à la recharge de la nappe phréatique, qui peut être utilisée à l'aval grâce à la réalisation de puits. Ces puits peuvent servir à irriguer de petits périmètres maraîchers ou contribuer à l'abreuvement du bétail. Une étude géotechnique sommaire peut permettre de se faire une idée de la faisabilité de cette option.

Figure 3
Organisation schématique des possibilités de valorisation de l'aval d'un barrage de culture de décrue (les flèches en trait plein représentent une alimentation de surface; les flèches en pointillé représentent une infiltration)



Conditions sociales et économiques favorables à la réussite du projet

Le choix du site et la conception même de l'aménagement de culture de décrue doivent représenter un optimum économique prenant en compte les données du projet. Ainsi, le rapport entre la superficie de la cuvette cultivable et le volume du barrage doit être le plus élevé possible, ce qui correspond le plus souvent à de bonnes conditions topographiques telles que celles évoquées précédemment (pages 8-9). L'aménagement doit être implanté le plus près possible des lieux de vie des futurs utilisateurs. Certains sites, très favorables du point de vue topographique et géotechnique, peuvent présenter un intérêt très limité s'ils sont trop éloignés. Toutefois, en Mauritanie, il convient de tenir compte de la mobilité dont font preuve les populations.

Par ailleurs, la superficie de la cuvette doit être en rapport avec la force de travail et donc la main d'œuvre disponible: aménager de très grandes cuvettes n'a de sens que si les exploitants sont suffisamment nombreux pour les mettre en valeur. De nombreux barrages, réalisés dans le passé, sont sous-exploités à cause d'une insuffisance de main d'œuvre. En outre, il y a lieu de privilégier les projets où:

- des initiatives techniques individuelles ou collectives démontrent une compétence affirmée des agriculteurs; et
- des amorces de réalisations d'aménagements individuels ou collectifs laissent supposer que les populations sont motivées et aptes à maîtriser et gérer des aménagements plus sophistiqués.

En revanche, dans le contexte de pauvreté chronique du monde rural mauritanien, la notion de rentabilité économique des petits aménagements de culture de décrue n'a que peu de sens. L'essentiel des céréales cultivées (sorgho, blé, etc.) est en effet le plus souvent destiné à l'autoconsommation, sans, d'ailleurs, que les quantités produites soient suffisantes pour assurer la subsistance des exploitants tout au long de l'année. Les cultures de décrue peuvent ainsi constituer une activité complémentaire à l'élevage en fournissant un appoint de nourriture indispensable aux pasteurs. Elles peuvent aussi offrir une base alimentaire aux populations sédentaires en proie à l'extrême pauvreté, comme les Harratines des tamourts.

Pour assurer la pérennité de l'aménagement, il convient également de clarifier la situation foncière de la zone à cultiver avant d'engager des investissements. Il s'agit de mettre en place une stratégie de sécurisation foncière des exploitants. Celle-ci doit reposer sur une analyse approfondie de la situation foncière et sociologique de chaque site, en privilégiant des méthodes participatives qui tiennent compte de la complexité de la société mauritanienne et, notamment, des décalages pouvant exister entre des textes récemment adoptés et la situation réelle de certains groupes de population sur le terrain. Cette démarche doit aboutir à la conclusion d'arrangements, tels que les ententes foncières déjà expérimentées dans la zone de Maghama, entre les détenteurs de droits fonciers, coutumiers ou écrits, et les exploitants qui mettront en valeur la superficie inondable. L'un des principes de ces ententes est de permettre aux plus vulnérables d'accéder à la terre de manière durable et sécurisée en échange, pour les "propriétaires" traditionnels, d'une valorisation de leurs terres grâce à la réalisation des aménagements (et éventuellement, de l'attribution d'une surface plus grande dans la cuvette). Il faut en revanche chercher à éviter ou supprimer les redevances en nature ou en espèces, payées traditionnellement par les "sans terre" aux "propriétaires", car elles constituent souvent un facteur favorisant le maintien des plus vulnérables dans la pauvreté.

3. Conception et réalisation des barrages en remblai

Géométrie et compactage des remblais

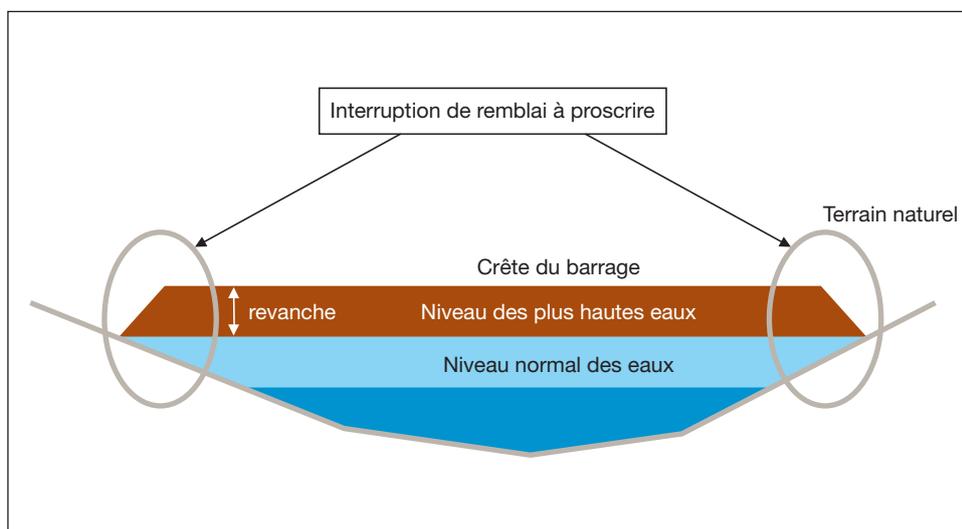
En théorie, la plupart des barrages de culture de décrue construits en Mauritanie sont des remblais de type homogène réalisés en matériaux argileux compactés. Les pentes des parements varient de 1,5/1 à 3/1. On observe plus rarement des pentes de 4/1. Toutefois, certains remblais, y compris ceux réalisés par des entreprises, présentent des pentes irrégulières. Les protections des parements sont très variables, allant de l'absence totale à la réalisation de perrés très soignés.

Géométrie des remblais

Rappelons en premier lieu qu'une géométrie irrégulière des talus et de la crête est à proscrire. Leur rectitude en plan n'a pas de conséquence directe sur la stabilité proprement dite de l'ouvrage, mais l'horizontalité de la crête et la régularité des pentes sont très importantes pour sa durabilité et celle des protections. Toute différence de cote ou de pente est en effet susceptible de devenir un point de concentration des eaux pluviales et de générer des ravines d'érosion qui peuvent se révéler très préjudiciables à plus ou moins long terme, jusqu'à entraîner la ruine de l'ouvrage. Le contrôle du chantier doit donc être particulièrement vigilant sur ces points.

Le choix des pentes de talus se fait en vérifiant leur stabilité en fonction du matériau employé. Il s'agit de contrôler la stabilité d'ensemble, mécanique et hydraulique, en tenant compte des écoulements internes, facteur important dans le jeu des contraintes qui sollicitent le remblai. Compte tenu de la taille des barrages considérés, des pentes de 2/1 ou 2,5/1 sont en général bien adaptées pour assurer leur stabilité. Des pentes inférieures à 2/1 sont à éviter. Les valeurs supérieures présentent le double avantage de garantir la stabilité et d'assurer une meilleure durabilité des protections (qui ont moins tendance à glisser vers le bas et sont plus faciles à compacter), mais elles sont nettement plus coûteuses.

Figure 4
Interruption du remblai à l'endroit où la cote du terrain naturel correspond au niveau des plus hautes eaux, une pratique à proscrire



Il convient d'exclure une pratique fréquemment constatée, qui consiste à interrompre le remblai à chacune de ses extrémités, à l'endroit où le terrain naturel atteint la cote des plus hautes eaux (figure 4).

Ce choix semble dicté à la fois par un souci d'économie à court terme et par le fait que les deux extrémités ainsi interrompues peuvent faire office de déversoirs exceptionnels pour évacuer des crues imprévisibles, mais toujours possibles étant donné les incertitudes de l'hydrologie, ce qui constitue en quelque sorte une négation du rôle de la revanche⁵ en tant que marge de sécurité par rapport à la crue de projet et au battillage (vagues). Cependant, le plus grave est que ces pseudo-déversoirs latéraux provoquent souvent d'importants problèmes d'érosion régressive, parfois fatals pour l'ouvrage, et ce dès leur première utilisation. De tels évacuateurs exceptionnels de crues sont plutôt à prévoir à l'emplacement des cols naturels en bord de cuvette lorsqu'ils existent, comme nous le préconisons page 10.

Importance du compactage

En ce qui concerne le compactage, des déficiences et des malfaçons ont souvent été constatées sur les barrages en Mauritanie. Certains n'ont même pas été compactés du tout. Il est essentiel de rappeler l'importance de cette phase du chantier, tant pour la stabilité du barrage que pour son étanchéité.

Classiquement, le compactage est réalisé à l'optimum Proctor normal (+ ou - 2%). Les sujétions d'arrosage sont généralement contraignantes en Mauritanie car il faut souvent parcourir plusieurs kilomètres pour trouver l'eau nécessaire, même si l'on commence le chantier dès la fin de la saison des pluies, ce qui est une sage précaution. Au vu des nombreux problèmes d'approvisionnement en eau, on peut toutefois suggérer de compacter les remblais en utilisant plutôt comme référence l'optimum Proctor modifié, qui nécessite une plus grande énergie de compactage (engins plus lourds et passages plus nombreux), mais une teneur en eau inférieure à celle requise par l'optimum Proctor normal (et parfois égale à la teneur en eau naturelle du matériau, cas très favorable qui évite l'arrosage). Le surcoût énergétique est certainement largement compensé par les économies dégagées sur le transport de l'eau.

D'une manière générale, on n'insistera jamais assez sur l'importance du contrôle de compactage en cours de chantier. La surveillance doit être très stricte et très fréquente voire continue. Les principaux points à vérifier sont les suivants:

- qualité des matériaux extraits des zones d'emprunt (ce qui suppose également que des études préliminaires sérieuses aient été menées pour les identifier correctement);
- nombre de passage des engins; et
- teneur en eau et densité de compactage, tant au niveau du remblai qu'à celui de la tranchée d'étanchéité en fondation.

Il convient également de signaler une pratique fréquente en Mauritanie qui consiste à incorporer un ancien remblai à un nouveau barrage. On ne peut qu'émettre des réserves quant à cette intégration d'un ouvrage ancien dont on ne connaît pas avec certitude les caractéristiques de compactage, d'étanchéité ou de drainage. Il serait certainement préférable d'abandonner ces barrages sommaires et de reconstruire entièrement un nouvel ouvrage à proximité (ou de les raser et de réutiliser éventuellement les matériaux, après essais de mécanique des sols).

Cependant, il faut bien admettre que cette incorporation permet dans certains cas de réaliser des économies substantielles sur les volumes de remblai. Si cette option est retenue, il y a lieu de prendre les précautions suivantes:

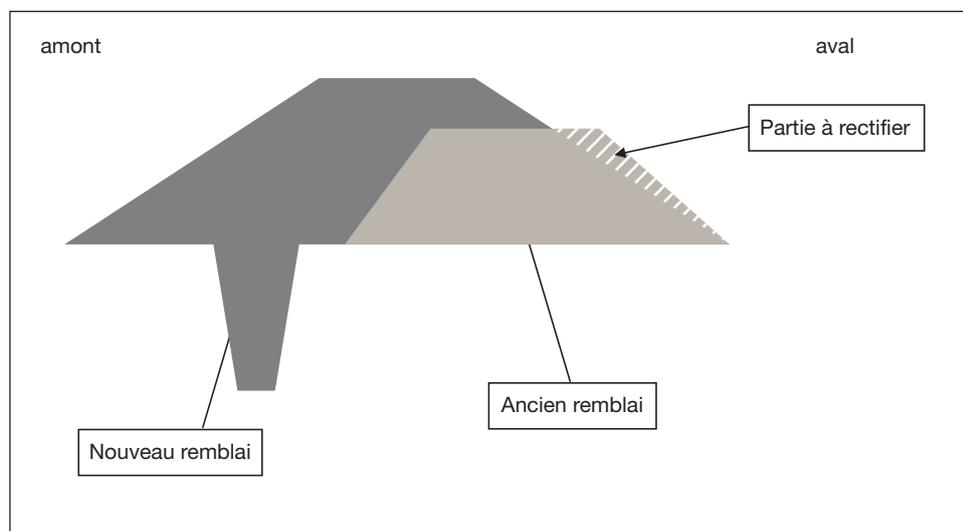
5 La revanche est l'intervalle entre le niveau des plus hautes eaux et la crête du barrage

- Pratiquer sur l'ancien remblai les mêmes reconnaissances que pour la fondation (perméabilité, densité, etc.). Une campagne de reconnaissance au pénétromètre, en particulier, permettra de vérifier l'homogénéité du matériau sur toute sa longueur;
- Considérer le nouveau barrage comme un barrage à zones et placer systématiquement l'ancien remblai dans la partie aval. S'il est trop perméable, il est à considérer comme une partie drainante; en particulier, il convient de vérifier que les règles de filtre entre l'ancien et le nouveau remblai soient respectées, afin d'éviter la formation de renards; si ce n'est pas le cas, il faut interposer un filtre granulaire ou un géotextile;
- Veiller à la bonne étanchéité du complément d'argile placé en amont. C'est également sous ce même talus en amont que doit être traitée l'étanchéité de la fondation (il faut toujours considérer que cela n'a pas été fait correctement sous le remblai existant); et
- Si l'ancien remblai présente de bonnes caractéristiques de densité et d'étanchéité et l'interposition d'un filtre n'est pas indispensable, assurer une bonne liaison entre les deux remblais en décapant, scarifiant et humidifiant autant que de besoin.

Il faut en outre noter qu'en cas d'incorporation d'un ouvrage ancien, un problème de géométrie se pose souvent pour le nouveau barrage. Il n'est pas rare en effet que l'ancien talus présente des pentes dont la déclivité est supérieure à 2/1. Il est donc nécessaire de rectifier la pente en aval afin de la rendre conforme à la nouvelle pente générale du barrage et d'éviter de créer un changement de pente qui risquerait d'affaiblir l'ouvrage (figure 5). Il faut naturellement disposer une protection de talus correcte (enrochement ou tout-venant fortement compacté) sur l'ensemble du parement aval ainsi constitué.

Enfin, s'agissant du compactage, il faut également signaler les difficultés que connaissent les entreprises pour le réaliser correctement au contact des ouvrages en béton (bajoyers⁶ des évacuateurs de crue en particulier). Ce problème peut être résolu par l'emploi, strictement contrôlé, de petits matériels de type lame vibrante, en compactant de minces couches de sol. Toutefois, il est préférable, autant que possible, de couler les éléments en béton après la réalisation des remblais, de manière à assurer le meilleur contact possible entre les deux composantes.

Figure 5
Rectification d'un talus à forte pente dans le cas de l'intégration d'un ancien remblai dans un nouveau barrage



6 Un bajoyer est un mur séparant un ouvrage en béton d'un remblai en terre.

Traitement de la fondation

Contact remblai-fondation

La jonction entre les premières couches de remblai et le terrain naturel doit être correctement réalisée. Il faut au préalable décaper la terre végétale et supprimer tout débris organique. Une bonne liaison est ensuite assurée grâce à une scarification et, éventuellement, une humidification du terrain ainsi traité.

Tranchée d'étanchéité

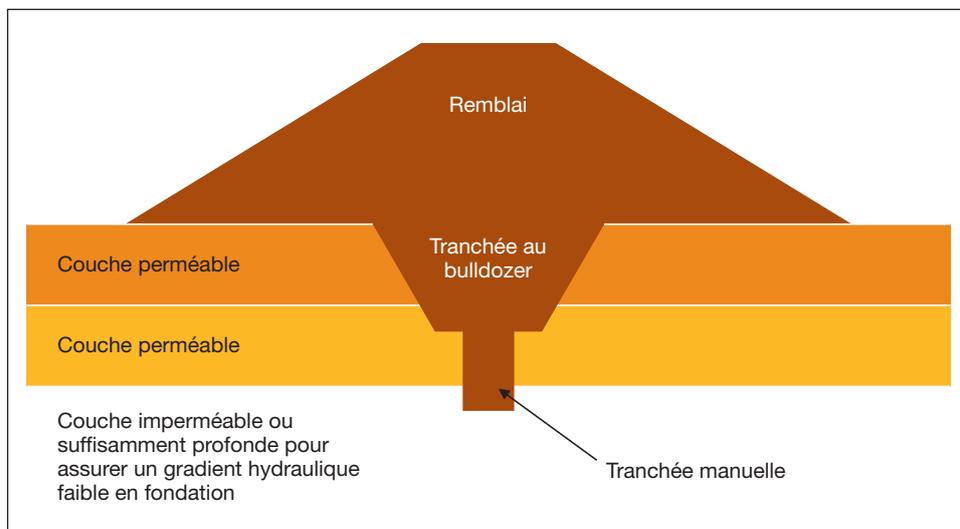
La tranchée d'étanchéité, qui joue également le rôle de clé d'ancrage, est réalisée avant le remblai et avec le même matériau que celui-ci. Sa profondeur est déterminée en fonction de la hauteur d'eau et des analyses effectuées au cours des études préliminaires, en particulier les reconnaissances visuelles. La profondeur diminue depuis la partie centrale du barrage vers les ancrages latéraux et peut augmenter par endroits pour atteindre la première couche de sol imperméable présente en fondation. Lorsque les fondations imperméables sont trop profondes pour être atteintes par la clé d'étanchéité classique creusée au bulldozer, on peut recourir à des techniques de tranchée étroites, voire à des injections de bentonite-ciment en cas de terrain rocheux insuffisamment étanche. De tels dispositifs renchérissent toutefois notablement le traitement de la fondation, surtout dans le cas des petits barrages. Ajoutons que, si elles ne compromettent pas la sécurité de l'ouvrage, les fuites peuvent être tout à fait acceptables dans le cas des barrages de culture de décrue car:

- les barrages sont de toute façon vidangés en fin d'hivernage; et
- la recharge de nappe peut également être l'un des rôles bénéfiques joués par ce type d'ouvrage.

Ainsi, étant donné que les sols des oueds en Mauritanie sont souvent sableux, la tranchée d'étanchéité doit avoir une profondeur suffisante de sorte que, selon les charges hydrauliques, le gradient soit suffisamment faible pour éviter la formation de renards.

Une bonne méthode pour obtenir ce résultat consiste à réaliser une tranchée classique au bulldozer et à la prolonger au besoin par une tranchée creusée manuellement et remblayée avec de l'argile compactée à l'aide d'un petit rouleau vibrant (figure 6). On peut ainsi

Figure 6
Schéma de principe d'une tranchée d'étanchéité classique creusée au bulldozer et prolongée par une tranchée manuelle



atteindre facilement des profondeurs de 3 ou 4 mètres, ce qui suffit bien souvent à limiter le gradient hydraulique dans le cas des petits barrages de culture de décrue. Cette solution présente l'avantage de ne pas être trop coûteuse et constitue un procédé astucieux pour approfondir lorsque l'on constate, en cours de chantier, la présence impromptue de couches perméables qui n'avaient pas été repérées lors des études préliminaires.

En revanche, pour garantir la sécurité des ouvriers, la tranchée manuelle ne doit pas être creusée au-delà d'1,5 mètre.

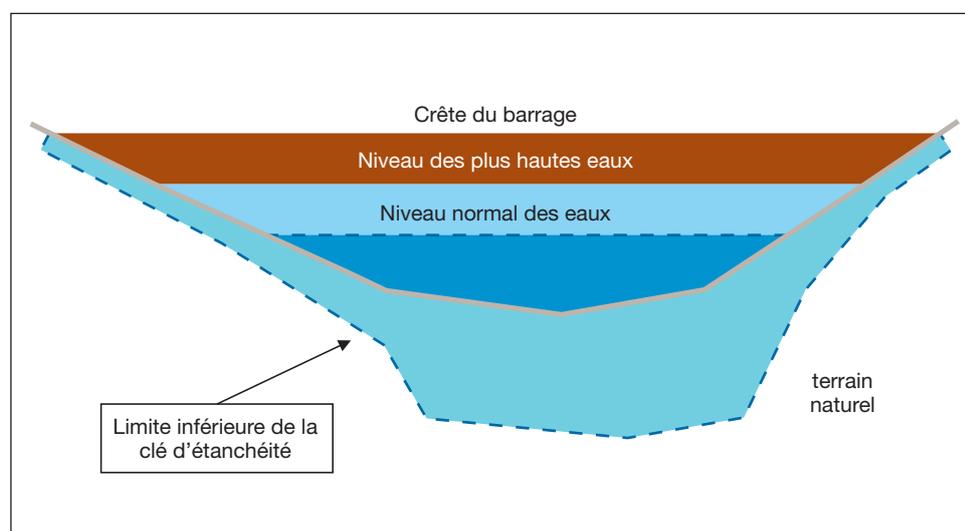
La tranchée d'étanchéité, tout comme le remblai (cf. premier paragraphe page 18), se poursuit jusque dans les appuis latéraux; en fait, l'ensemble doit garantir que le niveau des plus hautes eaux est entièrement barré par une structure étanche (figure 7). En pratique, au niveau des appuis latéraux, la profondeur de la tranchée est généralement de l'ordre de 50 centimètres à 1 mètre, dans le cas des petits barrages de décrue.

Drains

Rappelons que les drains ont pour fonction d'intercepter les débits d'infiltration afin d'éviter que leur résurgence incontrôlée à l'aval ne nuise à la stabilité de l'ouvrage (sous-pressions, renards, etc.). La vaste majorité des petits barrages de décrue mauritaniens ont été construits sans aucun système de drainage. On peut cependant noter que les drains ne sont pas absolument indispensables dans ce cas. En effet, étant donné que le barrage est vidangé à la fin de la saison des pluies, le remblai n'a théoriquement pas le temps de se saturer si sa perméabilité est suffisamment faible. Néanmoins, il peut arriver que le barrage ne soit pas vidangé, faute de possibilités de mise en culture (conflit entre exploitants, moyens insuffisants, etc.). Dans ce cas, l'absence de drainage peut compromettre la sécurité de l'ouvrage. En outre, un mauvais compactage ou la présence de matériaux dispersifs mal identifiés ne sont pas à exclure. On peut donc recommander de prévoir systématiquement un dispositif de drainage, du moins pour tous les barrages dépassant 3 mètres de hauteur.

Les drains les plus adaptés seront en général les drains-tapis granulaires du fait de leur facilité de réalisation et étant donné que le matériau (sable grossier et gravier) est généralement abondant à proximité des sites de barrages en Mauritanie. Disposé au moins dans le tiers central du barrage, sous le talus aval au niveau du contact sol-remblai, il s'étend sur un quart à un tiers de l'emprise du remblai dans le sens de la largeur. Le respect des conditions de filtre entre le drain et le remblai, d'une part, et entre le drain et le sol en place, d'autre part, doit être vérifié.

Figure 7
Coupe longitudinale schématique d'un barrage et de sa clé d'étanchéité.



Afin de permettre un fonctionnement optimal du système de drainage, il est nécessaire de prolonger le tapis par la réalisation d'un fossé drainant au pied aval du barrage, creusé transversalement à l'axe de la vallée, sur une longueur équivalente à l'emprise du drain. Ce fossé est généralement rempli de matériau drainant (sable grossier et gravier).

Protection des talus et de la crête

La protection des talus et de la crête du barrage revêt un caractère indispensable dès lors qu'il s'agit d'éviter leur dégradation sous l'action de diverses agressions extérieures: battillage pour le parement amont, érosion due à la pluie et/ou au passage de piétons, d'animaux et de véhicules pour l'ensemble des talus et de la crête.

Habituellement, la protection du talus amont est différente de celle du talus aval et de la crête; elle est plus conséquente car elle doit résister à l'action des vagues.

Protection du talus amont

La protection la plus courante est le perré sec, avec ou sans couche de pose (photo 4). Les pierres employées sont généralement de bonne qualité (schistes, quartzites), mais leur taille est parfois insuffisante et leur assemblage est souvent peu soigné. Les dégâts dus au battillage sont toutefois peu importants car les barrages ne restent en eau que quelques mois et l'action mécanique des vagues ne s'exerce donc que sur une période limitée. Cependant, sur le long terme, il est préférable de réaliser ces protections en suivant quelques règles simples:

- Prévoir une couche de pose: elle peut être réalisée en gravier (en respectant les règles de filtre) ou en géotextile; elle empêche l'aspiration des matériaux fins du remblai lors du reflux des vagues.
- Ranger et appareiller les enrochements à la main: cette solution est la plus adaptée aux petits barrages dans le contexte mauritanien et ce type de travaux peut être avantageusement réalisé selon des méthodes dites "à haute intensité de main d'œuvre". Toute option consistant à déverser les enrochements depuis la crête est à proscrire.



Photo 4: Pose d'un perré amont sur un géotextile (barrage de Vété, Assaba), une solution valable lorsqu'elle est correctement réalisée... ce qui n'est pas le cas de ce barrage. Il faut en effet interposer une couche de pose entre le remblai et le géotextile; en outre, la surface de ce remblai aurait dû être reprise car elle est déjà entaillée par des ravines d'érosion dues aux pluies survenues en cours de chantier.

Notons que la solution qui avait été adoptée pour les anciens barrages de Magta-Lajar et de Sangarafa donne entière satisfaction: des plaques de schiste posées en boutisses sur le talus, voire enfoncées, et se bloquant mutuellement par appui sur leur plus grande face (photo 5). La mise en œuvre doit être continue et progresser latéralement en diagonale afin d'éviter la formation de panneaux délimités par des lignes de pose verticales, qui pourraient constituer des zones vulnérables à l'érosion. Plus longue et donc plus coûteuse à mettre en place, cette solution n'en demeure pas moins très efficace.

Lorsqu'on ne dispose pas de blocs de taille et de qualité suffisantes, mais seulement de galets ou de cailloux de taille plus réduite, il est possible de réaliser des protections de talus amont en matelas Reno (gabions de faible épaisseur), posées sur un géotextile ou sur une couche de pose granulaire. Cependant, cette solution reste relativement coûteuse et peu réaliste pour des barrages de grande longueur présentant une importante surface amont à protéger.

Protection du talus aval

La protection des talus aval a souvent constitué un point faible des barrages en Mauritanie et nombre d'entre eux présentent des ravines d'érosion, parfois très profondes (photo 6). Elle est pourtant essentielle à la bonne tenue des ouvrages à long terme (le ravinement peut entraîner la formation de renards car, lorsqu'elles sont profondes, les ravines raccourcissent le cheminement des écoulements internes au remblai et augmentent par conséquent le gradient hydraulique; elles peuvent également provoquer des glissements de talus).

L'absence totale de protection du talus aval, parfois observée en Mauritanie, étant à exclure dans tous les cas, les protections les plus courantes sont les suivantes:

- L'enherbement: cette solution est peu praticable dans le contexte climatique mauritanien. Dans le passé, certains ont toutefois proposé l'utilisation d'une plante communément appelée "cram-cram" dans une couche de terre végétale préalablement étalée sur le talus. Il pourrait être intéressant de tester à nouveau cette méthode.



Photo 5: Protection du talus amont du barrage de Magta-Lajar par des plaques de schistes placées en boutisses.

- Le perré: si elle est correctement réalisée, cette solution est en général efficace, même lorsque la pente est à 1,5/1, mais elle demeure coûteuse. Elle peut toutefois être intéressante, surtout en présence d'embrochements à proximité et lorsqu'il est possible d'organiser un chantier à haute intensité de main d'œuvre.
- La couche de tout-venant compactée: c'est sans doute la solution qui offre le meilleur rapport qualité-prix dans le contexte mauritanien. Sa réussite tient essentiellement à trois conditions, qui doivent être vérifiées simultanément:
 - l'épaisseur de la couche: 20 centimètres semble être un minimum;
 - la pente du talus: l'expérience montre qu'on n'observe pratiquement plus de dégâts à partir de 2,5/1; une pente de 2/1 est acceptable, mais le compactage est moins facile; et
 - le compactage: sur pratiquement toutes les couches de protection qui n'ont pas été compactées apparaissent très rapidement des griffures d'érosion; la couche de pose doit donc être fortement compactée.

Protection de la crête

Comme le parement aval, la crête des petits barrages est souvent protégée par une couche de tout-venant compacté, méthode souvent efficace, même si le compactage est insuffisant. L'absence de protection est évidemment à proscrire dans ce cas également.

Les principes de construction sont les mêmes que dans le cas des talus aval: la couche de protection doit avoir au moins 20 centimètres d'épaisseur et être fortement compactée. Il est utile de prévoir un léger dévers vers l'amont (2 à 3%) afin de faciliter l'évacuation des eaux de pluie.

Enfin, le raccordement de la protection des talus à la crête doit faire l'objet d'une attention particulière, surtout si les types de protection utilisés sont différents, ce qui est généralement le cas avec les talus amont. Par exemple, les couches de pose en géotextile doivent être ancrées à la crête et le perré doit chevaucher l'arrête délimitant le talus et la crête.



Photo 6: Talus aval non protégé du barrage d'Amdar-Atar (Adrar). De profondes griffures d'érosion sont apparues et la pente du talus s'en trouve déjà modifiée par endroit, ce qui compromet la stabilité de l'ensemble de l'ouvrage.

4. Ouvrages hydrauliques incorporés dans un barrage en remblai

Évacuateurs de crue

La plupart des barrages, et tout particulièrement les barrages en remblai qui ne peuvent supporter aucune surverse, doivent impérativement comporter des organes leur permettant d'évacuer le surplus d'eau vers l'aval lorsque la cuvette a atteint la cote du niveau normal. Ces ouvrages, appelés "évacuateurs de crue", doivent être soigneusement conçus et réalisés car ils sont essentiels pour la sécurité des barrages et parfois même des populations qui vivent en aval.

Analyse critique des solutions couramment adoptées en Mauritanie pour la conception et la construction des évacuateurs de crues

Position de l'évacuateur et phénomènes d'érosion régressive

La plupart des évacuateurs de crues qui équipent les petits barrages de culture de décrue en Mauritanie sont conçus à partir d'un déversoir frontal de type poids, lorsqu'ils sont placés en face du lit mineur de l'oued, ou matérialisé par un muret en béton, lorsqu'ils sont situés aux extrémités du remblai. Les évacuateurs de crues sont généralement très longs et fonctionnent à faible charge. Le laminage n'a été que rarement pris en compte dans les calculs.

Notons qu'un positionnement latéral ou très éloigné du lit mineur génère très souvent de graves problèmes d'érosion régressive, constatés non seulement en Mauritanie mais aussi dans de nombreux pays d'Afrique (photo 7). En effet, en l'absence de coursier⁷ aménagé en aval du déversoir ou lorsque celui-ci est immédiatement suivi d'un dissipateur d'énergie, l'eau rejoint le lit mineur en suivant la ligne de plus grande pente. Le long de cette ligne, l'écoulement acquiert une vitesse suffisante pour arracher les particules du sol et créer ainsi un phénomène d'érosion qui se développe de l'aval, là où la vitesse est la plus forte, vers l'amont, de manière régressive par rapport au sens de cet écoulement. Cette érosion remonte



Photo 7: Destruction d'un évacuateur de crues placé en position latérale par suite d'un phénomène d'érosion régressive (barrage de Bambéra, Hodh El Gharbi).

7 Un coursier est un canal reliant le déversoir au dissipateur d'énergie.

jusqu'au déversoir, parvient à le déstabiliser et à le ruiner, allant même jusqu'à provoquer dans certains cas la vidange de la cuvette. Une fois l'évacuateur détruit, c'est le barrage et l'aménagement tout entiers qui sont donc menacés.

Ce type de conception, surtout guidé par la recherche du moindre coût de projet (grâce au gain réalisé sur la hauteur de l'évacuateur), est donc à éviter. Cette économie à court terme est en effet largement contrebalancée par le risque, très probable, de ruine totale ou partielle de l'ouvrage.

Il faut donc systématiquement privilégier le choix d'évacuateurs en position centrale, qui restituent les eaux directement dans le lit mineur via un dispositif de dissipation d'énergie

Figure 8
Positionnement correct d'un joint waterstop sur un joint de construction

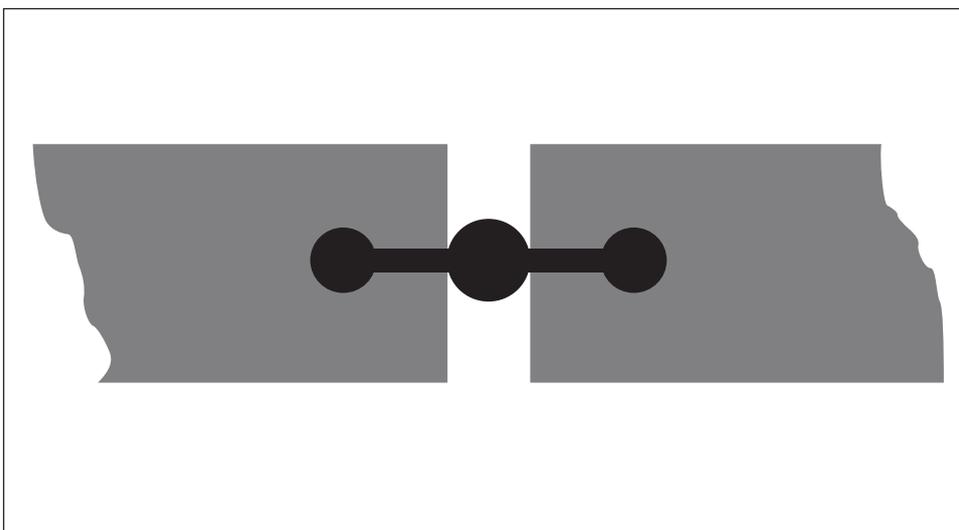


Photo 8: Vue d'un joint de construction. La séparation physique entre les deux plots est obtenue en intercalant une plaque de polystyrène; l'étanchéité est assurée par le joint waterstop, dont chacune des bandes est coulée dans les deux plots.

correctement conçu et dimensionné. Ce choix est d'autant plus réalisable que les barrages concernés sont en général de faible hauteur.

Importance d'une conception et d'une réalisation soignées des évacuateurs

De très nombreux évacuateurs de crues sont réalisés en béton. Les principaux problèmes rencontrés avec ces structures sont liés à la mauvaise qualité du béton et/ou à sa fissuration excessive à cause de l'absence de joints de construction ou parce que ceux-ci sont trop espacés.

Par conséquent, il convient tout d'abord de doser correctement le béton, de choisir des sables et des graviers propres et de respecter les délais nécessaires avant le décoffrage.

Pour limiter les effets de la fissuration, qui est plus ou moins inévitable dans le cas d'un ouvrage de grande longueur en raison du retrait qui se produit lors de la prise du béton, l'ouvrage doit donc être réalisé par plots juxtaposés, séparés par des joints de construction (figure 8). Pour assurer l'étanchéité, la solution la plus efficace consiste à intercaler entre les plots des joints "waterstop", coulés dans le béton de chaque plot (photo 8).

Certains évacuateurs de crues ne sont pas réalisés en béton mais sont en fait constitués d'une zone déversante aménagée dans le remblai, avec une protection renforcée par rapport aux talus avoisinants (en empierrement, en maçonnerie de moellons ou en gabions). Cette solution peut être acceptable, et même économiquement intéressante, si les lames d'eau ne dépassent pas quelques décimètres et à condition que la réalisation soit particulièrement soignée.

Pour éviter l'entraînement des matériaux fins du remblai lors du déversement, la mise en place de la protection sur un géotextile, correctement posé entre les enrochements et le remblai (en veillant au raccordement entre les⁸) est une solution satisfaisante (photo 9). Enfin, la partie située sur le talus aval doit être revêtue de manière identique afin d'éviter l'érosion due au passage rapide de l'eau. Elle peut être avantageusement réalisée en gradins de gabions, ce qui permet en outre de mieux dissiper l'énergie de l'écoulement et de limiter ainsi les dimensions du bassin de dissipation situé en pied d'ouvrage. Les gabions employés doivent être de préférence de facture industrielle car ils sont soumis à d'importantes contraintes et fréquemment noyés et dénoyés (risque accru de corrosion).



Photo 9: Barrage de Zemal (Brakna). Vue de la zone déversante aménagée dans le remblai, protégée par des enrochements posés sur un géotextile et prolongée par un dissipateur d'énergie en gradins de gabions.

8 Les lés sont les bandes de géomembranes.

Importance d'une liaison soignée entre bajoyers en béton et remblais

De nombreux problèmes liés aux renards ont pu être constatés sur les barrages mauritaniens, à la jonction entre les bajoyers des évacuateurs et les remblais au niveau des contacts tant horizontaux que verticaux, et constituent effectivement, si l'on n'y prend pas garde, des lieux privilégiés d'écoulement des eaux d'infiltration (photo 10).

Deux types de précautions, à considérer comme complémentaires, doivent être prises pour éviter les problèmes qui ont conduit à la destruction totale de plusieurs barrages en Mauritanie:

- Comme le mentionne la section page 19 sur le compactage, plutôt que de compacter derrière un bajoyer construit au préalable, opération difficile et à coup sûr insuffisante, il est préférable de réaliser un surplus de remblai correctement compacté à l'emplacement de l'évacuateur, puis de le tailler verticalement et d'utiliser la surface ainsi créée comme coffrage pour le bajoyer (l'autre surface destinée à être en contact avec l'eau doit être coffrée de manière classique). Cette solution est mieux indiquée pour assurer un bon contact béton-remblai, mais elle exige le plus grand soin dans sa réalisation.
- Il est nécessaire de prévoir des ailes perpendiculaires aux bajoyers, suffisamment enfoncées dans le remblai afin de diminuer significativement le gradient hydraulique (écrans anti-renard). De telles ailes doivent être également placées sous l'ouvrage, dans la fondation. Il ne faut pas hésiter à les surdimensionner quelque peu. En effet, les hypothèses retenues pour le calcul (à l'aide de la règle de Lane) peuvent être optimistes par rapport à la qualité de compactage du remblai réellement obtenue sur le chantier. Il ne faut pas sous-estimer non plus la difficulté dans le choix du coefficient de Lane. Si le barrage est zoné, les écrans doivent être coulés dans le noyau. D'un point de vue constructif, les écrans doivent être coulés en même temps que le bajoyer et ferrillés solidairement.

Propositions de variantes techniques pour la conception des évacuateurs de crues

Compte tenu de la nécessité de restituer les eaux évacuées dans le lit mineur de l'oued barré et donc de positionner l'évacuateur dans la partie centrale de l'ouvrage, il existe plusieurs



Photo 10: Destruction du remblai après l'apparition d'un renard au niveau du contact entre le bajoyer et le remblai (barrage d'Oued Abary, Brakna).

solutions possibles pour réaliser un déversoir rectiligne en béton poids. Toutes permettent d'obtenir une longueur déversante conséquente tout en occupant un espace limité et bien placé en vis-à-vis du lit mineur de l'oued. De ce fait, elles peuvent également aider à réaliser des économies par rapport à la solution classique (une étude comparative doit toutefois être menée au cas par cas pour confirmer ces aspects).

Évacuateur muni d'un déversoir en "bec de canard"

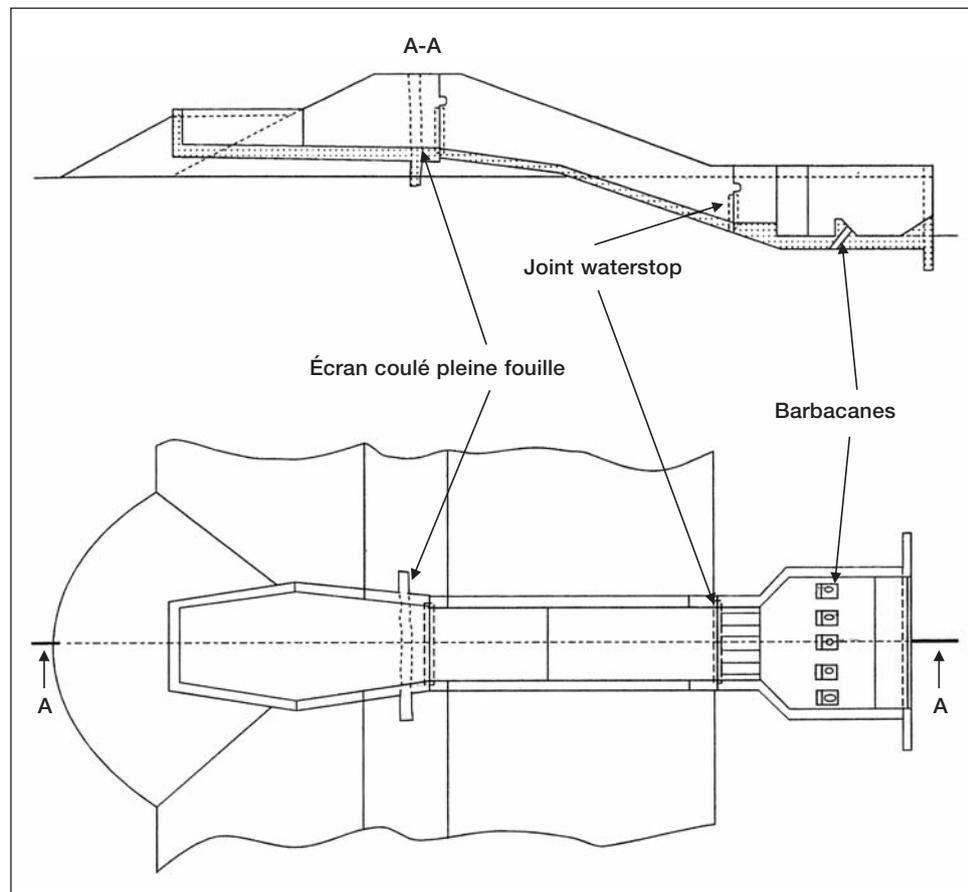
Le nom de cet ouvrage vient de ce qu'il évoque effectivement, dans sa forme la plus classique, un bec de canard ou un U couché: le seuil déversant présente une partie en demi-cercle prolongée par deux parties rectilignes (figure 9). Dans le cas des petits barrages de culture de décrue, pour simplifier la conception et surtout la réalisation, la partie curviligne peut être remplacée par une partie rectiligne, comme sur le schéma suivant.

Dans un cas comme dans l'autre, le seuil déversant constitue la partie supérieure d'une "boîte" dans laquelle un matelas d'eau permet d'amortir l'énergie de chute. L'écoulement passe ensuite dans un coursier en béton posé sur le talus aval dont la pente se raccorde à un bassin de dissipation permettant de rejoindre le lit mineur.

Évacuateur muni d'un déversoir en créneaux

Ce type de déversoir, conçu suivant une ligne brisée, offre une longueur déversante largement supérieure par rapport à un seuil linéaire, et ce, pour une même emprise dans la partie centrale du barrage (photo 11). Pour un fonctionnement correct, la dimension des

Figure 9
Schéma en coupe et vue de dessus d'un déversoir de type "bec de canard" (extrait de [8])



créneaux doit être nettement supérieure à la hauteur d'eau sur le seuil. Ce dernier doit toujours être dénoyé, sans quoi son fonctionnement se rapprocherait de celui d'un seuil linéaire de longueur équivalente à son emprise et l'on perdrait alors le bénéfice de la longueur supplémentaire offerte par la disposition en créneaux.

Il convient de noter que les créneaux ne sont pas toujours disposés à angle droit et peuvent aussi être conçus de la manière présentée en figure 10.

Variante possible pour la conception des zones déversantes réalisées au sein du remblai

Une alternative au simple enrochement de protection ou aux gradins de gabions, évoqués page 28, est la mise en place de matelas Reno sur une couche de géotextile. Ce type particulier de gabions, caractérisé par une épaisseur très inférieure aux autres (30 centimètres), est bien adapté à la conception de ce type de zone déversante. À lame d'eau équivalente, le grillage est moins sollicité lors des déversements que dans le cas des gradins. En revanche, sous l'effet de l'écoulement, les matériaux de remplissage peuvent se déplacer. Des essais ont mis en évidence les vitesses et les débits maximaux supportés par les matelas et au-delà desquels apparaissent des déformations préjudiciables. Ainsi, un parement aval déversant formé d'un matelas de 30 centimètres d'épaisseur supporte une vitesse limite de 6 mètres/seconde, soit un débit de crue maximum d'un mètre cube par seconde et par mètre

Figure 10
Variante possible pour la conception d'un déversoir en créneaux [10]

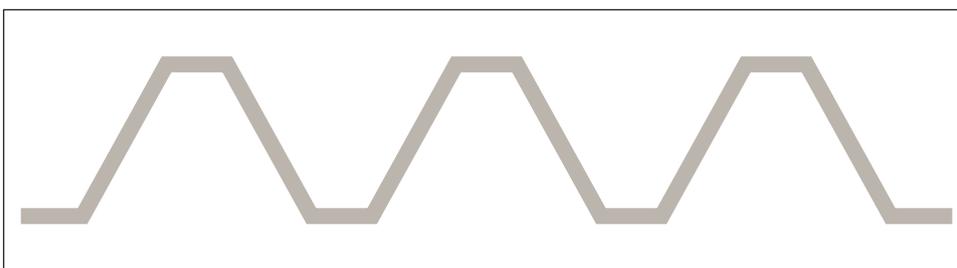


Photo 11: Déversoir en créneaux sur le barrage routier d'Achram (Tagant). Il inclut également une vidange par passe batardée (ouverte, au premier plan). N.B.: cet exemple présente toutefois un défaut majeur car aucun bassin de dissipation n'a été réalisé à l'aval de la structure déversante, qui risque donc de subir des affouillements.

linéaire. En pratique, cette solution est donc particulièrement adaptée aux faibles débits et à des hauteurs d'eau limitées. Comme dans le cas des gradins, cette structure déversante doit être prolongée en pied d'ouvrage par un bassin de dissipation également construit en matelas Reno (mais un peu plus large toutefois car on ne bénéficie pas de l'effet dissipateur des marches).

Une autre solution durable pour concevoir des zones déversantes consiste à réaliser un perré au mastic bitumineux. Expérimentée dans les années 60 en Côte d'Ivoire, elle a donné de bons résultats. Elle est toutefois subordonnée à la mise à disposition d'une centrale à bitume sur le chantier, ce qui limite les possibilités d'y recourir. Des solutions telles que la réalisation d'un perré maçonné ou d'une dalle déversante en béton armé ont aussi été adoptées quelquefois. Leurs coûts doivent être comparés au cas par cas avec des solutions plus classiques de type déversoir poids en béton, en fonction des conditions locales.

Dissipateurs d'énergie

La nécessité de restituer un écoulement tranquilisé dans le lit mineur de l'oued en aval du barrage, afin d'éviter un affouillement ou d'autres dégâts, rend indispensable la mise en place de dissipateurs d'énergie au pied des évacuateurs de crue ou à l'extrémité aval des coursiers qui les prolongent.

De nombreux barrages de culture de décrue en Mauritanie sont pourtant dépourvus de ce type d'ouvrage. Au mieux, les déversoirs aboutissent à des bassins de dissipation très simples, en béton ou en enrochements, dépourvus de blocs-chicanes et de blocs de chute et ne présentant pas d'enfoncement du radier⁹ au-dessous du niveau du terrain naturel (parfois, une contre-digue en gabions a été disposée en sortie de bassin). Le fond du bassin est parfois tapissé d'enrochements, qui ne sont pas toujours suffisamment pesants; les écoulements entraînent alors rapidement des dommages.

Les hauteurs déversantes étant généralement peu importantes, les dégâts que l'on peut observer sur ces bassins sommaires restent tout de même assez limités. Les dommages



Photo 12: Barrage d'Amder-Atar (Adrar). Déversoir-poids en béton cyclopéen suivi d'un bassin à ressaut, également revêtu en béton.

⁹ Le radier est la dalle de fondation d'un ouvrage.

constatés se caractérisent le plus souvent par des érosions du terrain naturel en aval (bassin trop réduit) ou par des destructions sur les ouvrages de dissipation eux-mêmes. Dans quelques cas, on peut constater une évolution de ces dommages susceptible de compromettre la sécurité générale du barrage.

La solution la plus adaptée pour les petits barrages reste le bassin à ressaut. Son profil (longueur et profondeur) est calculé de manière à créer et contenir un ressaut, qui correspond au passage de l'écoulement torrentiel issu de l'évacuateur à l'écoulement fluvial restitué dans le lit mineur de l'oued, en aval du barrage. Ce ressaut dissipe l'énergie excédentaire dans le bassin, qui doit donc être revêtu afin d'éviter les affouillements. Les méthodes de calcul sont illustrées notamment dans la référence [8]. Le principe repose sur la nécessité de recalculer la cote fluviale en aval du bassin de sorte qu'elle corresponde au tirant d'eau normal de l'oued en ce point.

Le revêtement doit être de préférence en béton ou en gabions (matelas Reno) (photo 12). Les enrochements sont acceptables, mais ils doivent être choisis avec des dimensions suffisantes pour éviter d'être entraînés par les courants.

Comme nous l'avons vu précédemment (page 28), les bassins de dissipation peuvent être avantageusement précédés par des dissipateurs en gradins (de gabions ou de béton) (photo 13). Du fait de la dissipation d'énergie obtenue par l'écoulement de l'eau sur les marches, les dimensions des bassins peuvent être notablement réduites. Des méthodes de calcul sont présentées dans la référence [8]. Le principe de la dissipation sur les gradins varie selon le débit: en cas de faible débit, l'énergie se dissipe par l'impact de l'eau sur chaque marche; en cas de débit plus importants, l'énergie se dissipe par la formation de rouleaux au niveau de chaque marche.

Ouvrages de vidange

La fonction même des barrages de culture de décrue confère aux ouvrages de vidange une importance toute particulière. La fiabilité du fonctionnement de ces organes doit donc être totale. Pour ce faire, la priorité doit être accordée à la simplicité et à la robustesse (ce qui ne signifie pas, loin de là, une absence de suivi et d'entretien).



Photo 13: Barrage de Sangarafa (Brakna). Vue du déversoir à seuil épais en béton, suivi d'un dissipateur d'énergie en gradins de gabions et d'un bassin de dissipation sommaire en enrochements. Le dispositif a prouvé son efficacité car cet ouvrage est déjà ancien et aucun dégât majeur n'y est apparu.

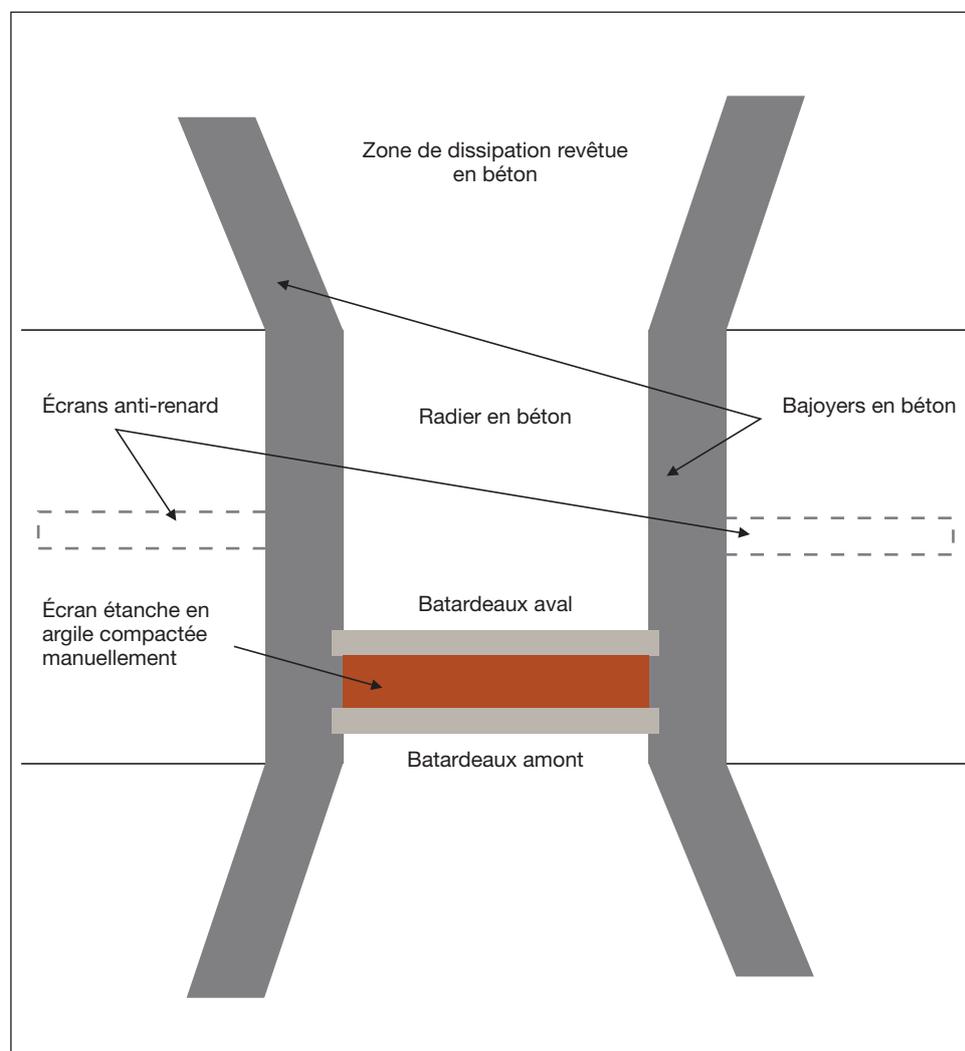
Trois types d'ouvrage de vidange correspondent à ces critères et sont employés avec succès en Mauritanie.

Passé batardée

C'est l'ouvrage de vidange le plus répandu. Enchâssé dans le remblai ou, plus rarement, dans un déversoir en béton, sa robustesse est avérée et son maniement des plus simples. Son coût est très raisonnable pour des barrages de quelques mètres de hauteur. Au-delà de 5 ou 6 mètres, la quantité de béton nécessaire peut lui faire préférer les autres solutions décrites dans les paragraphes suivants. Le schéma ci-dessous en donne le principe (figure 11).

Les batardeaux¹⁰ sont constitués de planches de bois ou de poutres métalliques (IPN ou UPN) superposées pour former deux parois parallèles entre lesquelles on compacte un écran en argile afin d'assurer l'étanchéité en attendant la vidange. Les batardeaux métalliques sont préférables aux planches, plus déformables et susceptibles d'être endommagés par les xylophages.

Figure 11
Schéma de principe des vidanges à passe batardée



10 Planches ou tronçons de poutres métalliques que l'on superpose pour fermer un ouvrage de vidange.

Pour réaliser une passe batardée, on enlève les planches ou les poutrelles les unes après les autres en détruisant simultanément l'écran d'argile, ce qui permet l'écoulement progressif de l'eau contenue dans la cuvette. Le débit souhaité est obtenu en enlevant simultanément un nombre plus ou moins grand d'éléments. L'année suivante, il suffit de remettre en place les batardeaux dans les rainures prévues à cet effet et de reconstituer l'écran d'argile pour assurer à nouveau l'étanchéité du dispositif et permettre le remplissage de la cuvette (photo 14).

La cote du sommet des batardeaux doit être supérieure ou égale au niveau des plus hautes eaux. En effet, il est préférable d'éviter les déversements sur l'ouvrage de vidange, qui n'est pas conçu à cet effet (ils peuvent éroder l'écran d'argile ou endommager des batardeaux en bois).

Sur le plan constructif, comme le montre la figure 11, les bajoyers doivent avoir une forme convergente à l'amont et divergente à l'aval afin de favoriser l'écoulement. Comme pour les évacuateurs de crue, il convient de prévoir des écrans anti-renard en béton, solidaires des bajoyers et coulés pleine fouille dans le corps du remblai. Une partie des bajoyers (l'aval généralement) peut être réalisée en gabions.

Ouvrage de vidange avec canalisation enterrée sous le remblai

Deux types de canalisations enterrées peuvent être utilisés:

- La galerie enterrée en béton, généralement de section carrée (1 m x 1 m). Ce dispositif est en fait assez peu différent du précédent puisque l'admission se fait à l'amont par une passe batardée et l'écoulement dans la galerie est à surface libre (photo 15).
- La conduite fonctionnant en charge, enterrée sous le remblai. Elle peut être constituée d'une buse ARMCO ou d'une canalisation en fonte, acier ou béton. Elle peut être commandée par une vanne, mais le système le plus adapté aux petits barrages de décrue est encore le système de passe à batardeaux, placé en amont afin d'éviter de laisser la conduite en charge et donc de minimiser les risques de fuites et de renards le long de la surface extérieure de la conduite (photo 16).



Photo 14: Vidange par passe batardée du barrage de Guévéra (Assaba); bajoyers amont en béton; bajoyer aval et zone de dissipation en gabions; batardeaux en poutrelles métalliques IPN.

Le second type d'ouvrage est le plus employé après la passe batardée et ne pose que peu de problèmes, à condition:

- de bien soigner les liaisons béton-conduite au niveau de l'entonnement et du débouché;
- de compacter très soigneusement le remblai autour de la conduite et de disposer des écrans anti-renard coulés pleine fouille (notamment vers l'amont); ces écrans sont particulièrement indispensables dans le cas des buses ARMCO, dont les liaisons entre éléments peuvent donner lieu à des fuites; et
- de prévoir un bassin de dissipation correctement réalisé en aval (gros enrochements, gabions ou béton) (photo 17).



Photo 15: Ouvrage de vidange "classique" en béton. Barrage de Boukhleikhil (Hodh el Gharbi).



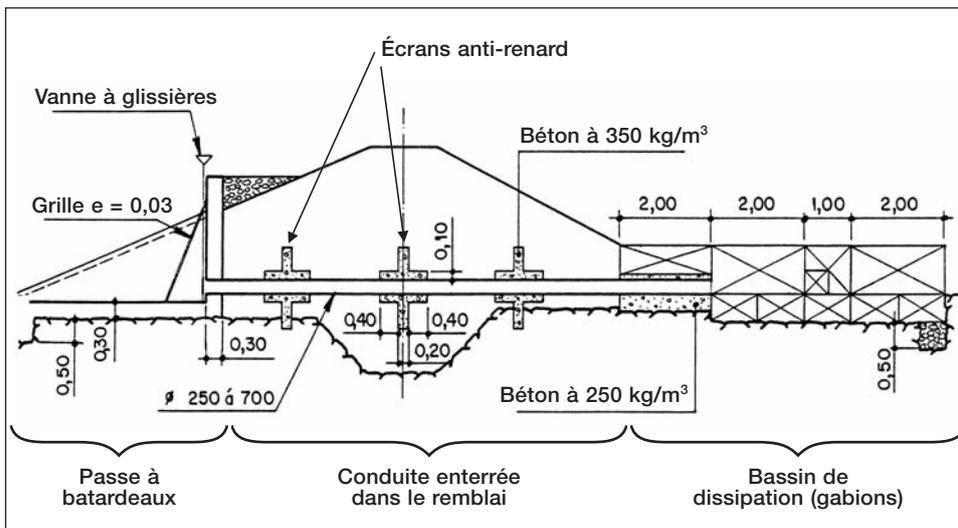
Photo 16: Partie amont de la vidange du barrage de Leklewa (Brakna). Détail de la liaison entre la buse ARMCO et la passe à batardeau.



Photo 17: Vue de l'aval de la conduite de vidange du barrage d'Aweinat Ar (Tagant); noter la protection efficace du bassin de dissipation en moellons posés à bain de mortier (le raccordement au lit mineur n'est toutefois pas satisfaisant car des affouillements sont apparus).

Figure 12

Vue en coupe d'un organe de vidange constitué d'une conduite enterrée sous le remblai et commandée à l'amont par une passe à batardeaux [3]



Échelles limnimétriques

La mise en place d'échelles limnimétriques devrait être systématique lors de la construction de barrages, tant pour assurer leur surveillance que pour gérer la réserve d'eau. Le type le mieux adapté est l'échelle en tôle émaillée, dont l'approvisionnement est facile et le coût modéré. Elle peut être fixée sur une partie en béton de l'ouvrage (partie amont d'un bajoyer de passe batardeée par exemple, comme sur la photo 14). À défaut, elle peut être soudée sur une poutrelle IPN qui sera scellée en fond de cuvette par un plot en béton.

5. Autres types de barrages

Si les barrages en remblai constituent la majorité des ouvrages construits pour la culture de décrue en Mauritanie, quelques barrages de types différents ont parfois été réalisés. Ils peuvent offrir des solutions intéressantes en fonction des conditions locales et notamment lorsque les matériaux argileux font défaut.

Barrages en enrochements

Constitués de blocs de pierre, voire d'un tout venant grossier, ils appartiennent en fait à un type particulier de barrages en remblai, dont l'étanchéité ne peut être garantie ni par la nature des matériaux, ni par le compactage. Celle-ci doit donc être assurée par un organe complémentaire, qui peut être une paroi étanche interne ou un masque amont, posé sur le talus selon des modalités qui dépendent de la nature du barrage. Quelle que soit la solution adoptée, le dispositif d'étanchéité du remblai doit cependant être soigneusement relié à celui de la fondation.

Les parois étanches internes peuvent être réalisées en béton dans le cas des petits barrages (mais les risques de fissuration, et donc de perte d'étanchéité, sont importants). Il convient de préférer des matériaux plus souples, comme la bentonite-ciment ou le mastic bitumineux cyclopéen, plus appropriés pour réagir aux variations de contraintes internes sans se fissurer. Cependant, les sujétions relatives à la mise en œuvre de ces solutions les rendent peu réalistes dans le cas des petits barrages en Mauritanie.

L'installation d'un masque amont de type dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG) semble offrir une solution nettement plus prometteuse, d'autant que ce type de matériau est désormais tout à fait compétitif.

Une description détaillée des DEG figure dans la référence [8]. Les points suivants méritent notamment une attention particulière:

- Le DEG doit être correctement mis en place étant donné qu'il ne s'agit pas de poser tout simplement une géomembrane sur la surface du talus. Celle-ci doit en effet être insérée entre une couche de protection, au-dessus, et une couche support et une couche de forme en-dessous.
- En pied de talus, la géomembrane doit être solidement raccordée à un parafouille¹¹ en béton, lui-même relié au dispositif d'étanchéité en fondation.
- La géomembrane doit être également solidement fixée sur la crête.
- La stabilité d'ensemble du DEG doit faire l'objet d'un soin particulier pour éviter les risques de rupture de type plan. En pratique, il faudra certainement opter pour une pente de talus 2/1 ou 2,5/1, même si la stabilité du talus en enrochements pourrait être assurée à partir de 1,5/1.

Barrages en béton ou en maçonnerie de moellons

Ce type d'ouvrage massif, résistant à la poussée de l'eau grâce à son poids et à sa résistance interne, a parfois été réalisé en Mauritanie.

La première condition pour envisager de construire un barrage en béton ou en maçonnerie est la qualité de la fondation, la meilleure configuration étant offerte par la présence à faible profondeur d'un substratum rocheux peu fissuré.

11 Un parafouille est une paroi en béton qui ancre l'ouvrage en fondation en assurant l'étanchéité.

Le profil transversal est en général un trapèze asymétrique (pente plus forte à l'amont), qui dépend en fait de la capacité ou non du barrage à déverser. Le talus aval peut alors être réalisé en gradins afin de dissiper l'énergie de l'eau. La construction de ce type de barrage doit respecter scrupuleusement les prescriptions en matière d'ouvrages en béton, qui sont pratiquement les mêmes que celles à observer dans le cas des déversoirs-poids (partie amont réalisée avec un dosage riche en mortier pour assurer l'étanchéité, qualité des bétons et coffrages, joints de construction avec waterstops, etc.).

Barrages de types particuliers

Des barrages voiles en béton armé à contrefort peuvent être envisagés. Réalisables sur le même type de fondation que les barrages poids, ils nécessitent une quantité moindre de matériau mais une plus grande technicité de l'entreprise.

Quelques barrages de décrue ont également été réalisés à partir d'un rideau de palplanches. Bien qu'ils aient été construits il y a plusieurs décennies, ils ont bien résisté. Leur étanchéité n'est sans doute pas parfaite, mais les risques de destruction sont faibles. Leur réalisation est cependant conditionnée par la disponibilité du matériel de battage¹².

¹² Le matériel de battage est une machine qui sert à enfoncer les palplanches.

Bibliographie

- [1] CHLEQ J.L. et DUPRIEZ H., *Eau et terres en fuite*, L'Harmattan, ENDA, 1984.
- [2] COLLECTIF, *Apports et crues – Manuel pour l'estimation des crues décennales et des apports annuels pour les petits bassins versants non jaugés de l'Afrique sahélienne et tropicale sèche*, FAO, ORSTOM, CEMAGREF, Bulletin FAO d'irrigation et de drainage numéro 54, Rome, 1996. <http://www.fao.org/docrep/W2570F/W2570F00.htm>
- [3] COLLECTIF, *Mission d'expertise sur les barrages de culture de décrue*, Rapport à la SONADER, Bureau d'ingénieurs conseils Coyne et Bellier, 1981.
- [4] COLLECTIF, *Séminaire international sur les petits barrages dans le monde méditerranéen*, Recueil des résumés, IDR, Hydromed, INRCREF, Tunis, 2001, http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/divers3/010026135.pdf
- [5] DEGOUTTE, G., DEYMIER C., DURAND J.M., PEYRAS L., sous la coordination de ROYET P., *Les ouvrages en gabions*, Collection techniques rurales en Afrique, Ministère de la Coopération, Paris, 1992.
- [6] DURAND J.M., *Expertise de 45 barrages en Mauritanie, bilan et analyse critique*, Rapport à la Direction de l'Environnement et de l'Aménagement Rural, 2000.
- [7] DURAND J.M., et BOISSEZON J., *Utilisation des barrages et des ressources en eau en Mauritanie*, Mauritanian Consulting Group, 1999.
- [8] DURAND J.M., ROYET P. et MERIAUX P., *Technique des petits barrages en Afrique sahélienne et équatoriale*, EIER-CEMAGREF Éditions, 1999.
- [9] STEPHENS T., *Manual on small earth dams: A guide to siting, design and construction*, FAO, 2010, 124 pages. <http://www.fao.org/docrep/012/i1531e/i1531e.pdf>
- [10] TOURMENT R., *Petits barrages en Mauritanie: bilan, analyse critique et introduction de variantes techniques*, Document CEMAGREF, Aix-en-Provence, avril 2000.



Fonds international de
développement agricole
Via Paolo di Dono, 44
00142 Rome, Italie
Téléphone: +39 06 54591
Télécopie: +39 06 5043463
Courriel: ifad@ifad.org
www.ifad.org
www.ruralpovertyportal.org

