

viande tête⁻¹ an⁻¹, voir partie 1.1.1). Ce calcul suppose qu'il y a suffisamment de fourrage dans les pâturages de saison des pluies, aussi pour les plus gros cheptels. La productivité des cheptels dans les systèmes d'élevage extensifs est maintenant de l'ordre de 1 kg de viande par 200 kg de fourrage sec. Cette productivité peut s'accroître dans le cas d'un développement progressif, mais pour le moment on n'en a pas tenu compte. Quand de nouveaux endroits sont ouverts pour l'élevage extensif sédentaire, la production est calculée en égalant la production de viande à la quantité de fourrage supplémentaire disponible divisée par 200.

Ces calculs des bénéfiques peuvent donner des résultats pessimistes: le rapport nourriture ingérée/viande produite des petits ruminants, par exemple, est plus élevé que celui du gros bétail. D'autre part la production de lait par le bétail est plus efficace que celle de la viande. Par conséquent, des mesures pour augmenter la productivité des moutons, des chèvres et la production de lait sont rentables dans des conditions où ces mesures ne sont pas encore rentables pour la production de la viande des boeufs, pourvu qu'un marché suffisamment grand existe pour ces produits. Dans cette étude, nous avons préféré ne pas entrer dans ces domaines de la productivité animale et de la socio-économie, ce qui peut être souhaitable pour établir les possibilités de développement d'une zone.

8.3 L'INSTALLATION DES POINTS D'ABREUUREMENT

8.3.1 Introduction

Chacun des 3 principaux systèmes d'élevage distingués dans la partie 8.1 a ses problèmes spécifiques avec l'eau pour abreuver le bétail.

- Nomadisme: (partie nord du Sahel). Un problème permanent de trouver de l'eau.
- Transhumance: le problème d'eau se pose pendant les migrations en juillet-août et en octobre-novembre, et pendant toute la saison sèche sauf à proximité des grands fleuves.
- Elevage sédentaire: (partie sud du Sahel). Le problème d'eau se pose en général d'octobre à juin.

Comme indiqué dans la partie 8.1 le plus grand problème dans le sud du Sahel est la mauvaise qualité des pâturages pendant la saison sèche. Mais dans le nord du Sahel ce n'est pas cette qualité qui empêche l'utilisation du pâturage mais le manque d'eau. Donc dans ces régions on pense tout de suite à l'installation des points d'abreuvement.

Il y a 2 systèmes principaux de points d'eau à distinguer:

- les puits (ø 1-2 m) et les forages (ø 0,1-0,2 m);
- les points de collection d'eau de ruissellement ('mares').

Ces 2 types ont leurs avantages et leurs inconvénients. Le premier n'est pas toujours possible à cause du manque de la nappe d'eau. En plus il y a un risque de surpâturage (s'il n'y a pas un contrôle strict) car la disponibilité d'eau n'est pas en relation avec la disponibilité du fourrage. Donc avec un grand débit d'eau dans une année avec peu de biomasse, la dégradation des parcours (même quasi irréversible), par surpâturage est possible. Un avantage est cependant la bonne protection contre la contamination par urines et fèces animales.

Le deuxième type a comme avantage que depuis qu'il y a une relation entre pluviosité

et production on peut s'attendre à ce que la biomasse et l'eau pour abreuver soient toujours dans un rapport constant. Ceci diminue le risque de surpâturage mais ne résoud pas le besoin d'une alternative pour l'éleveur pendant les années sèches. C'est pourquoi il faut que la dimension des points d'eau se base sur une année sèche et que le point d'eau ne contienne jamais plus que la quantité d'une année sèche pour éviter un agrandissement des troupeaux dans une période avec beaucoup d'années normales ou humides. Ceci implique que pendant les années normales ou humides il y a plus de biomasse qu'il n'y a d'eau disponible pour le bétail. Dans ce cas les animaux peuvent pâturer en sélectionnant les espèces et peuvent donc brouter des herbes d'une bonne qualité.

L'utilisation de l'eau d'écoulement dans les régions semi-arides est connue depuis très longtemps. Au Sahel on connaît le système de mares qui sont souvent temporaires. Depuis longtemps ces mares sont approfondies par l'homme pour obtenir un meilleur stockage d'eau. Dans les régions semi-arides en Indes on appelle les mares 'tanks' mais le système est exactement comme au Sahel. Dans les régions semi-arides de l'Australie et des Etats-Unis presque toute l'eau pour abreuver le bétail et le gibier provient du stockage de l'eau de surface. Ici la technologie appliquée pour le recueillement et le stockage de l'eau est bien développée et les investissements dans ces points d'eau sont souvent élevés.

Le but de cette partie n'est pas d'indiquer une ou plusieurs solutions exactes pour des problèmes concernant l'eau pour abreuver les bêtes, mais veut montrer une manière de considérer le problème et veut surtout illustrer qu'un très grand nombre de facteurs jouent un rôle. Pour pouvoir résoudre un cas spécifique il faut qu'on précise d'abord ces facteurs comme le système d'élevage pour lequel le point d'eau doit servir, l'endroit, le nombre des animaux, le prix du travail, le prix de la viande, des matériaux etc. Les prix sont mentionnés ici approximativement pour donner un ordre de grandeur des investissements et pour présenter le rapport entre revenus et investissements. Les prix du matériel sont valables pour le Sahel, qui sont en moyenne le double des prix en Europe. Nous recommandons que pour chaque cas spécifique une étude approfondie soit encore exécutée.

8.3.2 Besoins des animaux, production de la biomasse

Les besoins des animaux ont été estimés à 25 litres d'eau UTB^{-1} jour⁻¹ et à 6,25 kg de matière sèche UTB^{-1} jour⁻¹. La surface des pâturages utilisables par les troupeaux aux alentours d'un point d'eau varie avec la manière d'abreuver. Si l'on compte que le bétail doit boire chaque jour et la distance de marche maximale est de 12 km jour⁻¹, la superficie de la zone est environ 100 km² (un rayon de 6 km). Si les troupeaux ne boivent qu'une fois tous les 3 jours le rayon augmente jusqu'à 18 km et la superficie jusqu'à 1.000 km². Ce n'est possible que là où la qualité reste suffisamment élevée pendant la saison sèche.

La production dans 3 zones du Sahel a été estimée dans le tableau 8.3.1 pour une année normale et une année sèche (voir partie 3.2). Avec l'estimation des pourcentages du pâturage utilisable par le bétail nous avons calculé la biomasse utilisable par ha et pour 2 zones aux alentours d'un point d'eau. (Il faut qu'on se réalise que l'installation des points d'abreuvement, sans une gestion stricte des pâturages, reste toujours dangereuse. Donc on suppose ici qu'au moment de l'installation des points d'eau la gestion des pâtu-

Tableau 8.3.1. La production primaire utilisable dans une année moyenne et une année sèche (p50% et p90%, voir partie 3.2). Notez que pour le Sahel moyen et sud la fraction de la production qui est utilisable est plus élevée dans une année sèche que dans une année normale (due à meilleure qualité de la production primaire). R représente le rayon de la superficie exploitée autour le point d'eau.

		Sahel nord	Sahel moyen	Sahel sud
Année normale (p50%)				
pluviosité	(mm an ⁻¹)	200	400	600
production	(kg ha ⁻¹)	600	1.600	2.400
fraction production utilisable		0,20	0,10	0,07
production utilisable	(kg ha ⁻¹)	120	160	170
production pâturage R = 6 km	(kg)	1,4 10 ⁶	1,8 10 ⁶	1,9 10 ⁶
production pâturage R = 18 km	(kg)	12,2 10 ⁶	-	-
Année sèche (p90%)				
pluviosité	(mm an ⁻¹)	125	270	430
production	(kg ha ⁻¹)	200	800	1.200
fraction production utilisable		0,30	0,15	0,10
production utilisable	(kg ha ⁻¹)	60	120	120
production pâturage R = 6 km	(kg)	0,7 10 ⁶	1,8 10 ⁶	1,4 10 ⁶
production pâturage R = 18 km	(kg)	6,1 10 ⁶	12,2 10 ⁶	-

Table 8.3.1. The utilisable primary production in an average year and a dry year (p50% and p90%, see part 3.2). Note that for central and south Sahel the fraction of the production which is utilisable, is higher in a dry year than in a normal year (because of a better quality of the primary production). R represents the radius of the exploited area around the watering point.

rages est telle que le surpâturage n'existe plus et que la qualité des pâturages reste acceptable.) Dans ce cas, en se limitant aux boeufs dans un élevage traditionnel, les revenus se basent sur une production de 13 kg de viande par tête par an. Donc au prix de viande de 600 FM kg⁻¹ (voir partie 8.2) les bergers pourraient gagner environ 3,4 FM kg⁻¹ de biomasse consommée, et les revenus d'un m³ d'eau consommée pourraient être 850 FM.

8.3.3 Puits et forages

L'avantage d'un puits est que l'exhaure de l'eau est possible avec l'énergie humaine ou animale à l'aide de moyens très simples (sac et corde). L'avantage d'un forage est que les frais de construction sont souvent plus bas que pour un puits, que la profondeur peut être plus que la profondeur maximale d'un puits (qui est environ 100 m) et par conséquent que le débit peut être plus grand (par l'utilisation d'un grand rabattement) qu'avec un puits. Cependant, le désavantage d'un forage est qu'on a besoin de la technologie en forme d'une pompe pour l'exhaure de l'eau. Toutes les formes de pompes sont en usage, pompes à main ou à pied, pompes avec traction animale, pompes solaires et pompes électriques à moteur d'énergie fossile.

Les frais des puits et des forages sont difficiles à indiquer. Tout dépend fortement de la manière de calcul, si les frais d'amortissement et d'entretien sont inclus ou non, de la profondeur, de l'état du sol et de la roche etc. La construction d'un puits (tous les frais inclus) coûte entre 5 10⁴ et 2 10⁵ FM m⁻¹ en fonction de la profondeur et de l'état du sol/roche. Le prix total d'un puits varie beaucoup: de 1,5 10⁶ FM (Sinyanga

Wells Projet, comm. pers.) 2,5 10⁶ FM (Bruyns, comm. pers.), 4 10⁶ FM (Vorin, 1979) jusqu'à 5 10⁶ FM (projet au Seno Mango, selon l'Essor, un journal malien, du 17 mars 1979). Le prix d'un forage, exprimé par mètre est en général un peu moins cher, et varie entre 5 10⁴ et 1 10⁵ FM m⁻¹. Etant donné qu'un forage est souvent plus profonde qu'un puits le prix total d'un forage varie entre 2 10⁶ (Mali Aqua Viva, 1978) et 6 10⁶ FM (Vorin, 1979).

Une étude géohydrologique du Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (C.I.E.H., 1976) a montré qu'au-dessous de 50% de la surface du Mali il se trouve une nappe aquifère continue (unités 0-3 de la fig. 8.3.1) à 20-60 m de profondeur, et un puits y a un débit de 10-1.000 m³ jour⁻¹. L'autre 50% du territoire malien n'a qu'une nappe discontinue (unités 4-8 de la fig. 8.3.1) avec une profondeur et un débit très variable. En général la profondeur des puits augmente du sud au nord. Dans la zone entre les parallèles 14-15° N la profondeur moyenne est de 10 m avec un débit moyen de 75 m³ jour⁻¹ (variation 12-290). Entre les parallèles 15-16° N la profondeur moyenne est de 30 m et le débit moyen 100 m³ jour⁻¹ (variation 0,7-600!) et dans la zone plus au nord du seizième parallèle la profondeur moyenne est de 61 m avec un débit moyen de 50 m³ jour⁻¹ (variation 0,7-190), (C.I.E.H., 1976).

La plupart des chiffres ci-dessus concernent des puits des villages de la partie sud du Sahel qui sont souvent localisés sur des endroits plus favorables que les endroits où il y a un manque d'eau à ce moment. En plus la plupart des zones avec une biomasse non-exploitée par suite d'un manque d'eau sont situées dans la partie nord du Sahel. Donc pour des nouveaux puits et forages à construire on suppose une profondeur moyenne de 50 m avec une estimation pessimiste pour les frais, 2 10⁵ FM m⁻¹. Le prix total d'un puits ou forage est estimé à 1 10⁷ FM.

Fig. 8.3.1. Carte des grands ensembles hydrogéologiques du Sahel malien (C.I.E.H., 1976). Toutes les zones hachurées (no. 0 à 3) ont une nappe aquifère continue, d'autres (4 à 8) ne l'ont pas.

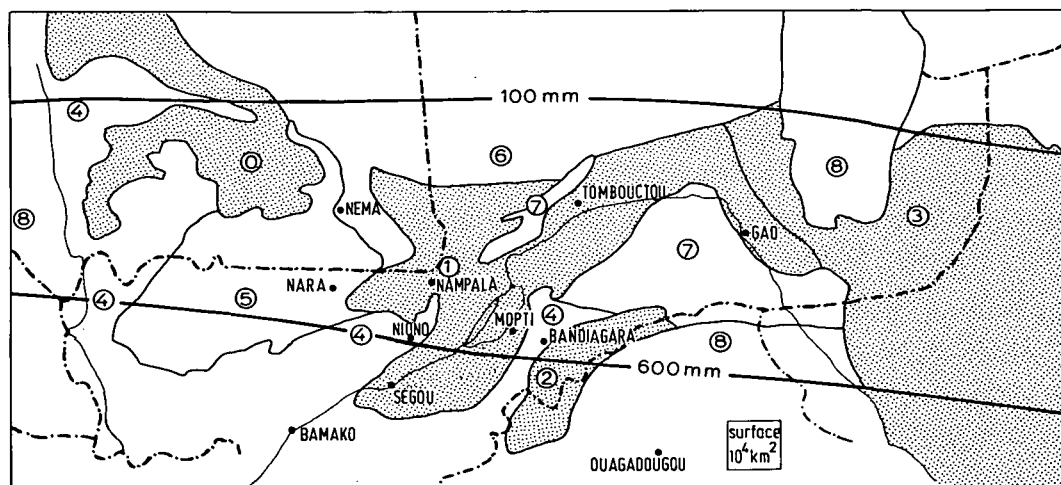


Fig. 8.3.1. Map of the major hydrogeological units of Malinese Sahel (C.I.E.H., 1976). All the hatched zones (numbers 0 to 3) have a continuous aquifer, the others (4 to 8) do not.

Le débit moyen d'un puits, déterminé par la perméabilité du sous-sol, est estimé (aussi d'une manière pessimiste) à $12 \text{ m}^3 \text{ jour}^{-1}$. Le débit d'un puits ne varie que légèrement avec la pluie de l'année en cours. A long terme, pendant une séquence des années sèches par exemple, le débit est affecté. De tout temps cette quantité est utilisable par les bergers à l'aide de la force animale. Plus un puits est profond plus du travail est nécessaire pour soulever ces 12 m^3 . Un tel puits peut entretenir environ 500 UBT. La consommation d'herbes est environ $1,1 \cdot 10^6 \text{ kg an}^{-1}$ de fourrage sec. Si cette consommation est prise d'une superficie de 100 km^2 , (rayon de 6 km aux alentours d'un point d'eau) les fractions d'utilisation de la biomasse seront suivant le tableau 8.3.1 17%, 6% et 4% dans une année normale et 50%, 13% et 8% dans une année sèche et pour les isohyètes de 200, 400 et 600 mm an^{-1} respectivement. Ces valeurs sont dans presque tous les cas au-dessous des fractions de la biomasse qui sont utilisables pour les animaux. Seulement dans le nord du Sahel les troupeaux seront obligés d'exploiter dans une année sèche une zone de plus de 100 km^2 . Une optimalisation du nombre des animaux par puits ou de la distance entre les puits n'est pas opportune ici. D'autre part dans un tel calcul un grand facteur de sécurité est obligatoire parce que la pluviosité d'une année sèche est une moyenne d'une grande surface et il est bien possible de trouver à l'intérieur d'une telle région dans une année sèche des endroits sans aucune précipitation à côté des endroits avec une précipitation normale. Cela fait qu'il est dangereux du point de vue du surpâturage et de la dégradation, de développer des points d'abreuvement pour plus de 500-1.000 animaux donc avec un débit de plus de $12-24 \text{ m}^3 \text{ jour}^{-1}$.

Si une région ne peut pas être exploitée du tout sans puits, l'installation d'un puits peut permettre l'augmentation du cheptel d'environ 500 UTB (au maximum). Les revenus sont environ $3,9 \cdot 10^6 \text{ FM}$ par an. Suivant ce calcul, un puits de $1 \cdot 10^7 \text{ FM}$ est amorti en 4 ans (avec 10% d'intérêt).

8.3.4 Utilisation de l'eau de la pluie

Dans ce système nous devons distinguer nettement le recueillement et le stockage de l'eau. L'eau qui coule sur la surface du sol peut être recueillie. Dans ce cas on préfère que la surface soit très imperméable à l'eau. Moins la surface est perméable plus on peut collecter de l'eau. Une autre possibilité est d'intercepter l'eau à une certaine profondeur dans le sol.

Le stockage de l'eau peut être utile à 2 stratégies d'abreuver les bêtes. On peut stocker l'eau pour toute l'année pour que le point d'eau permette un élevage sédentaire, ou bien le stock d'eau ne peut servir que pour une période limitée qui varie de quelques semaines à quelques mois après la saison de pluie et qui fonctionne pour prolonger la durée d'utilisation des régions sans eau, comme par exemple pour la transhumance à la partie nord du Sahel. Le sédentarisme est possible là où les gens peuvent cultiver le mil, dans les régions avec une pluviosité $\geq 400 \text{ mm an}^{-1}$. Donc pour la moitié nord du Sahel l'installation des systèmes d'élevage sédentaire à côté des systèmes d'élevage nomade et de transhumance ne semble pas réalisable et ne sera pas discutée ici.

Le stockage même peut être effectué selon des techniques diverses. On peut recueillir l'eau dans une dépression sur le terrain. Cette dépression peut être naturelle, naturelle

mais améliorée, ou complètement artificielle et éventuellement revêtue d'un matériel qui rend le fond et les flancs de la dépression imperméables à l'eau. Le désavantage sérieux est que beaucoup d'eau se perd par l'évaporation. Une autre possibilité est de stocker l'eau sans que l'évaporation puisse s'effectuer, c'est-à-dire dans un réservoir fermé en béton ou dans une cuvette remplie de sable.

Comme expliqué ci-dessus, le stockage ouvert ne semble pas être une vraie solution pour l'élevage sédentaire à cause des pertes dramatiques par infiltration profonde et par évaporation et aussi pour des raisons sanitaires. Donc ici un stockage fermé est préférable mais il est coûteux. Pour le stockage pendant quelques mois les possibilités sont plus nombreuses. Nous expliquerons d'abord les besoins en eau pour les 2 cas d'utilisation, permanente ou temporaire (novembre-décembre-janvier).

Contrairement aux puits et forages le nombre d'animaux n'est pas limité par la capacité du point d'eau mais il faut prévoir la capacité en se basant sur la production des pâturages. Avec les données de la partie 8.3.2 et du tableau 8.3.1 nous calculons le nombre maximal des animaux aux alentours d'un point d'eau pendant une année sèche (p90%) :

200 mm → 435 (R = 6 km) ; 4.350 (R = 18 km)

400 mm → 1.750 (R = 6 km)

600 mm → 1.750 (R = 6 km)

Dans le cas où les animaux ne restent pas toute l'année aux alentours des points d'eau mais seulement quelques mois il faut multiplier les nombres encore par un facteur 3. Dans certains cas il y a des raisons pour limiter le nombre d'animaux aux alentours d'un point d'eau. Si l'eau doit être puisée par les bergers il y a une limite physique à cause de l'espace autour des puits. Le nombre de bergers qui peuvent puiser en même temps et le nombre d'animaux qui peuvent boire en même temps sont limités. En plus les animaux ont besoin d'un certain temps pour boire et pour aller et venir. Si le point d'eau est à l'usage des animaux sédentaires il faut se réaliser qu'il existe toujours une superficie aux alentours qui reste nue tout le temps à cause du piétinement et à cause d'une exploitation précoce des jeunes plantes aussitôt après une germination. Cette superficie est estimée à 10 ha 100 UTB⁻¹. Si l'on veut limiter cette superficie dans un rayon de 600 m il faut se limiter à un nombre de 1.000 UTB par point d'eau.

Les discussions et les calculs sont tous faits pour ce nombre de 1.000 UTB, donc pour un besoin en eau de 6.750 m³ 9 mois⁻¹ et de 2.350 m³ 3 mois⁻¹. Si les conditions permettent un nombre plus élevé (par exemple avec stockage ouvert de l'eau ou avec utilisation pendant le passage des animaux de la transhumance seulement) on peut refaire les calculs en se basant sur les données de base incluses dans les parties qui suivent.

8.3.4.1 Stockage ouvert

L'option pour une dépression naturelle assez imperméable n'existe pas partout. Dans la partie sud du Sahel il y a des sols avec une couche de sable limoneux ou limono-sablonneux en surface et du limon ou de l'argile en profondeur. Il y a des mares temporaires existantes mais la plupart ne suffisent que pour 1-2 mois après la fin des pluies. Une grande partie du Sahel est couverte de sable assez perméable et le recueillement de l'eau par le ruissellement et le stockage ne sont possibles qu'avec des investissements

considérables.

Si la région permet la construction ou l'amélioration des mares, il faut considérer les pertes d'eau par l'infiltration profonde par le fond de la mare à 4 mm jour^{-1} donc 1.500 mm an^{-1} ou $360 \text{ mm 3 mois}^{-1}$. Ce chiffre peut diminuer pour les mares permanentes au cours du temps parce que le fond peut devenir de plus en plus imperméable à cause du dépôt des sédiments (argile et limon) transportés par l'eau. Pour les mares temporaires ce chiffre peut augmenter à cause de la formation des fentes dues à la rétraction de l'argile pendant la période sèche. Après l'agrandissement d'une mare par l'excavation aussi, le fond devient perméable, mais les années suivantes, ce fond tend à être de plus en plus imperméable par le dépôt des sédiments.

L'évaporation journalière de la surface d'eau libre au Sahel se fait comme suit:

janvier	6,6 mm	juillet	6,5 mm
février	8,6 mm	août	5,0 mm
mars	11,8 mm	septembre	5,2 mm
avril	12,2 mm	octobre	4,9 mm
mai	11,2 mm	novembre	6,2 mm
juin	8,7 mm	décembre	6,4 mm

L'évaporation totale pour les 9 mois secs (octobre-juin) est donc 2.300 mm! C'est surtout la saison chaude (mars-mai) qui compte pour ce chiffre dramatique. Ce total ne varie légèrement qu'entre le nord et le sud du Sahel (voir partie 3.2). L'évaporation totale des mois de novembre, de décembre et de janvier est de 580 mm.

La profondeur d'un réservoir ouvert qui doit débiter de l'eau toute l'année (9 mois) doit donc être au minimum 3,5 m pour pallier l'infiltration profonde et l'évaporation. Vu les possibilités de construction cette demande n'est presque pas réalisable. En plus il faut qu'on ajoute encore la couche d'eau disponible pour les animaux. Une couche de 1,5 m semble le maximum. Dans ce cas le réservoir a une profondeur de $3,5 + 1,5 = 5,0 \text{ m}$! Le rapport entre utilisation pour abreuver-infiltration profonde-évaporation est environ 2:2:3 donc l'efficacité d'utilisation est de 30%. Pour servir les 1.000 UBT avec les 6.750 m^3 il faut avoir un réservoir de 24.000 m^3 avec une profondeur de 5,0 m et aux dimensions de $67 \times 67 \text{ m}$.

Un réservoir qui sert pour 3 mois doit avoir une profondeur minimale de $0,36 + 0,58 = 1 \text{ m}$ pour l'infiltration profonde et l'évaporation. Avec une profondeur totale optimale de 3 m il reste une couche d'eau utilisable de 2 m. Pour abreuver encore 1.000 UBT avec 2.250 m^3 il faut un réservoir de 3.400 m^3 , d'une profondeur de 3 m et aux dimensions de $33 \times 33 \text{ m}$.

Ces chiffres sont basés sur des mares profondes qui sont difficiles à entretenir. En réalité la plupart des mares au Sahel sont temporaires parce qu'elles ne sont pas suffisamment profondes. Seules les mares à côté d'un village, qui sont creusées par l'utilisation de la terre pour la construction des maisons, sont assez profondes. Des mares avec une très grande superficie qui sont assez profondes au milieu, sont une autre possibilité (Mare de Gossi, par exemple). Dans ce dernier cas l'efficacité d'utilisation de l'eau est très inférieure à 30%.

Les frais pour excaver un réservoir sont estimés à $3 \cdot 10^3 \text{ FM m}^{-3}$ (Vink, comm. pers.). Donc les frais d'installation varient entre $1 \cdot 10^4 \text{ FM m}^{-3}$ d'eau utilisable (9 mois) et

$4,5 \cdot 10^3 \text{ FM m}^3$ (3 mois). Vu les revenus par m^3 d'eau consommée, cet investissement ne s'amortit jamais pour le réservoir pour 9 mois et en 8 ans pour le réservoir pour 3 mois (avec 10% d'intérêt).

On peut réduire l'infiltration profonde d'une mare par traitement avec une couche de ciment (à $7 \cdot 10^3 \text{ FM m}^{-2}$) ou par l'utilisation d'une membrane en plastic. Ce dernier coûte entre 80 FM m^{-2} (polyéthylène à une épaisseur de 0,05 mm) et $2,5 \cdot 10^3 \text{ FM m}^{-2}$ (chlorure de polyvinyle (PVC) à une épaisseur de 0,5 mm). Souvent du PVC (0,25 mm) à $1,2 \cdot 10^3 \text{ FM m}^{-2}$ est conseillé, mais nous avons utilisé ce dernier à 20 cm de profondeur dans le sol et constaté que des termites sont capables de perforer ce PVC.

Ces traitements diminuent les dimensions d'une mare et donc aussi les frais d'excavation (et aussi la surface de recueillement). Le prix d'eau utilisable devient donc $8,5 \cdot 10^3 \text{ FM m}^{-3}$ (9 mois et 5 m de profondeur) et $6,5 \cdot 10^3 \text{ FM m}^{-3}$ (3 mois et 3 m de profondeur) pour le béton et $6,5 \cdot 10^3 \text{ FM m}^{-3}$ (9 mois) et $4,5 \cdot 10^3 \text{ FM m}^{-3}$ (3 mois) pour le PVC.

8.3.4.2 Stockage fermé

L'avantage des systèmes où l'eau est protégée contre l'évaporation est aussi que l'eau reste propre. Elle n'est pas touchée par les animaux et donc pas contaminée avec les urines et les fèces. Cet aspect peut être d'une importance primordiale pour la santé des animaux.

La première possibilité est de construire une citerne de 6.750 m^3 (par exemple 4 m de profondeur et $40 \times 40 \text{ m}$) ou de 2.250 m^3 (4 m de profondeur et $24 \times 24 \text{ m}$). Les bergers doivent tirer l'eau comme ils le font avec un puits. Le prix des citernes de cette dimension en béton armé est estimé à $2 \cdot 10^5 \text{ FM m}^{-3}$. Donc l'investissement par m^3 de l'eau utilisable semble excessif.

Une autre manière d'obtenir un système fermé est de creuser un réservoir et couvrir le fond et les flancs avec du PVC et après remplir le réservoir avec du sable. Au milieu on construit un puits où les bergers peuvent prendre l'eau dont ils ont besoin. Le recueillement d'eau dépend du caractère de rétention d'eau du sol. En pratique, seul du sable assez grossier relâche assez d'eau vers le puits. L'argile et le limon retiennent trop d'eau et ne sont pas à utiliser comme réservoir pour l'eau. La présence du sable aux environs du réservoir à construire est donc une condition nécessaire.

La fig. 8.3.2 présente la situation d'un tel système. Si la cuvette a une profondeur de 3 m et le puits un niveau de drainage de 5 m, le premier mètre de la cuvette ne doit pas contenir de l'eau parce que cette couche est sensible à l'évaporation. Donc le niveau de remplissage maximal (sable saturé) est à 1 mètre au dessous de la surface. Suivant le caractère de rétention d'eau du sable S2 au ranch de Niono (fig. 3.3.8) la récolte maximale du système comme dans la fig. 8.3.2 est de 60 cm d'eau. Pour un stockage total de 6.750 m^3 il faut qu'on crée une cuvette de $100 \times 100 \text{ m}$ avec 3 m de profondeur. Les frais d'un tel système sont estimés à:

Fig. 8.3.2. Schéma d'une cuvette remplie de sable qui fonctionne comme réservoir d'eau pour abreuver les bêtes. Le rendement en eau de la cuvette dépend de la hauteur au-dessus du niveau de drainage. Ces rendements ont été calculés en se basant sur la caractéristique de rétention d'eau du sable S2 comme suit: le premier mètre donne 17 cm d'eau, le deuxième mètre donne 24 cm d'eau, le troisième mètre donne 28 cm d'eau, le quatrième mètre donne 30 cm d'eau.

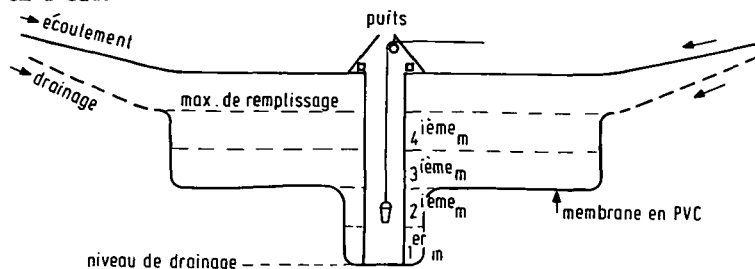


Fig. 8.3.2. Scheme of a sand-filled basin which acts as a water reservoir to water the animals. The water yield of the basin depends on the height above the drainage level. The calculations of these yields are based on the water retention characteristic of sand S2, as follows: first metre gives 17 cm water, second metre gives 24 cm water, third metre gives 28 cm water, fourth metre gives 30 cm water.

1) excavation	30.000 m^3 à $3 \cdot 10^3 \text{ FM m}^3$	= $9 \cdot 10^7 \text{ FM}$
2) remplissage	30.000 m^3 à $4 \cdot 10^3 \text{ FM m}^3$	= $1,2 \cdot 10^8 \text{ FM}$
3) PVC	10.000 m^2 $2,5 \cdot 10^3 \text{ FM}$	= $2,5 \cdot 10^7 \text{ FM}$
4) puits à construire		= p.m.
	Total	$2,35 \cdot 10^8 \text{ FM}$

Donc le prix du volume de stockage utilisable est $3,3 \cdot 10^4 \text{ FM m}^{-3}$. Vu les revenus actuels ce prix aussi est trop élevé.

8.3.4.3 Recueillement d'eau

La morphologie du paysage au Sahel est telle qu'il n'est pas difficile de trouver un bassin hydrographique (= impluvium) avec des pentes qui causent des ruissellements. Dans la partie sud du Sahel où les sols à la surface sont souvent limoneux, un impluvium naturel peut avoir un rendement de 30%. Un tel impluvium amélioré, c'est-à-dire nettoyé et débarrassé d'arbres et d'herbes et tassé peut avoir un rendement allant jusqu'à 50%. Les frais d'amélioration sont estimés à $2 \cdot 10^5 \text{ FM ha}^{-1}$ (Frasier, 1975). Dans la partie nord du Sahel la plupart des sols sont sablonneux et l'infiltration est trop grande pour qu'il se réalise un ruissellement naturel. Ici on peut stimuler le ruissellement en rendant la surface imperméable à l'eau. Il y a déjà beaucoup de méthodes et de produits disponibles pour un tel traitement de la surface. On peut distinguer 3 groupes:

(1) Membrane à la surface. La membrane est une barrière totale pour l'eau. Les membranes peuvent être:

- feuille de polyéthylène;
- feuille d'aluminium;
- couche d'asphalt;
- couche de béton.

(2) Produit chimique à la surface. Ce produit rend la surface hydrophobe, donc la pénétration de l'eau est très difficile;

- cire de paraffine;
- silicone hydrophobe;
- du sel (seulement pour les surfaces argileuses).

Le rendement (en eau) du premier type est environ 90-100% et celui du deuxième type 80% (Frasier et al., 1979).

Aux Etats-Unis (Frasier, 1975) et en Israël (Hillel, 1967) on a réalisé beaucoup d'expériences avec les produits et les techniques mentionnées ci-dessus. Au Sahel les expériences réalisées sont limitées (Martin, 1975; Bichet et Martin, 1976).

Il y a des problèmes divers avec ces traitements de la surface. Les membranes sont souvent trop faibles pour résister au piétinement du bétail. Donc une clôture chère est nécessaire. De même la température et la radiation solaire élevées diminuent la durée de vie des membranes. Les membranes très dures (béton, asphalt) sont en même temps très chères. Les traitements avec des produits chimiques ont une efficacité plus faible sur les sols sablonneux. Ici aussi le piétinement, la température élevée, etc. provoquent une durée de vie limitée des surfaces traitées.

(3) Pour des sols sablonneux qui sont très perméables, comme on en trouve dans la partie nord du Sahel il y a une troisième possibilité de recueillir l'eau captage en plaçant dans le sol une membrane imperméable. Le rendement (en eau) d'un tel système est difficile à prévoir. La pluie doit d'abord humidifier le sol et après l'eau doit s'écouler latéralement dans le sol au-dessus de la membrane. Le rendement est élevé si la couche au-dessus de la membrane est mince (cas extrême où la couche = 0; rendement = 90-100%) et le rendement diminue si la profondeur augmente (autre cas extrême est une couche $\rightarrow \infty$, rendement $\rightarrow 0$). Si la couche au-dessus de la membrane devient saturée il y a un risque d'érosion par le fait que les grains de sable ont tendance à flotter. La concentration des lignes d'écoulement dans le sol par écoulement latérale vers un point donne également un risque d'érosion considérable. Pour cette raison on installe un drain au-dessus de la membrane comme à la fig. 8.3.3 (par Shanan et al., 1980). Le rendement d'un tel système est estimé à 30-50%. La membrane même est sous une pente de 10%. Au milieu de la voie de capture il y a un drain dans lequel l'eau coule suivant la pente naturelle (1-3%) vers le point de stockage. Pour obtenir une grande superficie de recueillement il faut qu'on assemble plusieurs voies de captage (comme par exemple la fig. 8.3.4).

Les frais de ce système peuvent être calculés sur la base des frais d'excavation

Fig. 8.3.3. Voie de captage d'eau souterraine (selon Shanan et al., 1980).

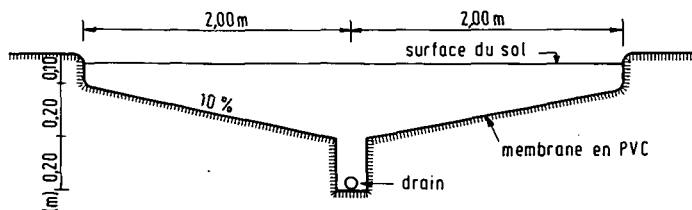


Fig. 8.3.3. Way to collect water below the surface (according to Shanan et al., 1980).

Fig. 8.3.4. Assemblage de plusieurs voies de captage d'eau souterraine.

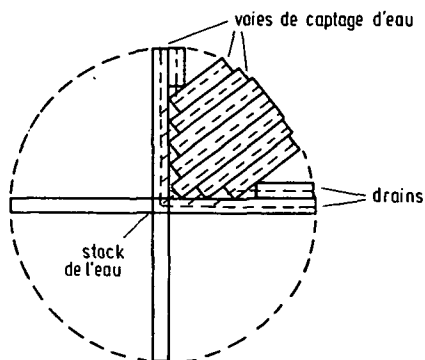


Fig. 8.3.4. Assemblage of several ways of collecting water below the surface.

Tableau 8.3.2. Superficies (en ha) des impluviums nécessaires dans différentes conditions et pluviosités pour 2 systèmes d'utilisation.

Rendement de ruissellement	30%		50%		90%	
	90%	95%	90%	95%	90%	95%
A: Présence 1.000 UBT, pendant 9 mois (besoin animal 6.750 m ³)						
Stockage (m ³)						
1. fermé 6.750	1e nord	18	23	11	14	6 8
2. ensablé 10.000	du Sahel -1	27	33	16	20	9 11
3. ouvert 24.000	200 mm an ⁻¹	64	80	38	48	21 27
1. fermé 6.750	1e milieu	8	10	5	6	3 3
2. ensablé 10.000	du Sahel -1	12	14	7	9	4 5
3. ouvert 24.000	400 mm an ⁻¹	30	35	18	21	10 12
1. fermé 6.750	1e sud	5	6	3	4	1,7 2
2. ensablé 10.000	du Sahel -1	8	9	5	5	3 3
3. ouvert 24.000	600 mm an ⁻¹	19	21	11	13	6 7
B: Présence 1.000 UBT, pendant 3 mois (besoin animal 2.250 m ³)						
Stockage (m ³)						
1. fermé 2.250	1e nord	6	8	4	5	2 3
2. ensablé 2.800	du Sahel -1	7	9	4	6	2 3
3. ouvert 3.400	200 mm an ⁻¹	9	11	5	7	3 4
1. fermé 2.250	1e milieu	3	3	2	2	0,9 1,1
2. ensablé 2.800	du Sahel -1	3	4	2	2	1,2 1,4
3. ouvert 3.400	400 mm an ⁻¹	4	5	3	3	1,4 1,6
1. fermé 2.250	1e sud	2	2	1,0	1,2	0,6 0,7
2. ensablé 2.800	du Sahel -1	2	2	1,3	1,5	0,7 0,8
3. ouvert 3.400	600 mm an ⁻¹	3	3	1,6	1,8	0,9 1,0

Table 8.3.2. Areas (in ha) of the impluviums necessary under different conditions and rainfall for 2 utilization systems.

($3 \cdot 10^3$ FM m^{-3}), de remblayage ($4 \cdot 10^3$ FM m^{-3}), des feuilles PVC (0,50 mm) à $2,5 \cdot 10^3$ m^{-2} et du tuyau de drainage à $1 \cdot 10^3$ FM m^{-1} . Le total s'élève à $4 \cdot 10^3$ FM m^{-2} pour ce système. Avec un rendement (en eau) de 50% dans une année sèche dans la partie nord du Sahel, pour 1.000 UBT pendant 9 mois par an il faut une superficie de recueillement de 11-38 ha (en fonction de la manière de stockage, voir tableau 8.3.2). Donc l'investissement pour le recueillement de 1 m^3 d'eau varie entre $6,5 \cdot 10^4$ et $2,2 \cdot 10^5$ FM. Vu les revenus qui peuvent être estimés à $8 \cdot 10^6$ FM pour 1.000 UBT toute l'année ou environ $3 \cdot 10^6$ FM pour 1.000 UBT pendant 3 mois seulement, ces prix sont très élevés.

En utilisant les données météorologiques et les besoins en eau on peut calculer les besoins en surface d'écoulement avec des rendements divers. Les résultats sont donnés au tableau 8.3.2. On voit que la surface nécessaire varie beaucoup selon l'utilisation de l'eau (9 mois ou 3 mois), selon l'efficacité de stockage (ouvert ou fermé) et selon l'efficacité d'impluvium (non-traité ou traité).

Il est évident que l'efficacité de l'aménagement est aussi fonction des investissements qu'on peut faire. Mais l'investissement n'est pas le seul facteur, même pas le facteur le plus important parce que la présence dans la nature des impluviums d'une certaine superficie joue dans cette option un rôle primordial. Cette présence varie d'un endroit à l'autre. Au ranch de Niono il y a des impluviums interduinaires excellents de 10-20 ha, mais dans d'autres régions les impluviums sont à déterminer de façon plus précise si l'on veut les utiliser comme indiqué dans cette option.

8.4 LA FERTILISATION ET L'IRRIGATION

8.4.1 Introduction

Le projet P.P.S. n'a pas étudié à fond les possibilités des cultures des plantes pour la production d'aliments pour les animaux. On peut se prononcer là-dessus cependant, car certains aspects de la croissance sont presque les mêmes pour toutes les espèces de plantes, ou une caractéristique d'un groupe, comme les espèces des types C_4 ou C_3 et les légumineuses (parties 4.2, 4.5 et 5.2). Il s'agit surtout de la photosynthèse, de l'efficacité de la croissance, de l'efficacité de l'utilisation de l'eau de la transpiration, et du comportement vis-à-vis de la disponibilité de l'azote (N), du phosphore (P) et des autres minéraux. Pour le but de cette partie, qui est de donner une première impression (voir partie 8.2) de ce qu'on pourra faire avec l'irrigation et la fertilisation pour les cultures fourragères, les différences dans les caractéristiques physiologiques entre les espèces sont assez limitées ce qui permet de négliger la plupart de ces différences. Quatre cas sont analysés: la production sans fertilisation ni irrigation, la production avec fertilisation, la production avec irrigation, et la production avec fertilisation et irrigation. Les légumineuses, qui n'ont pas besoin d'engrais azoté, sont considérées séparément.

Pour le calcul de la valeur économique du fourrage obtenu, il ne suffit pas de connaître la quantité du produit, mais la qualité joue un rôle aussi. Il est important de se rappeler ici que les graminées tropicales ont presque toujours un taux élevé de fibres cellulosiques, ce qui limite la digestibilité de ses protéines (partie 6.6.2.2). L'effi-