



HAL
open science

LA MAITRISE DE LA DEMANDE EN EAU ET EN ENERGIE EN AGRICULTURE IRRIGUEE : DE L'EVALUATION DES ENJEUX A LA PROPOSITION D' ACTIONS CIBLEES

Xavier Goossens

► **To cite this version:**

Xavier Goossens. LA MAITRISE DE LA DEMANDE EN EAU ET EN ENERGIE EN AGRICULTURE IRRIGUEE : DE L'EVALUATION DES ENJEUX A LA PROPOSITION D' ACTIONS CIBLEES. Energie électrique. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2005. Français. NNT: . tel-00557287

HAL Id: tel-00557287

<https://theses.hal.science/tel-00557287>

Submitted on 18 Jan 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° d'ordre : 3050

THESE

présentée à

L'UNIVERSITE BORDEAUX 1

ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGENIEUR

par **Xavier GOOSSENS**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPECIALITE : MECANIQUE

**LA MAITRISE DE LA DEMANDE EN EAU ET EN ENERGIE
EN AGRICULTURE IRRIGUEE :
DE L'EVALUATION DES ENJEUX
A LA PROPOSITION D' ACTIONS CIBLEES**

Soutenue le 4 novembre 2005

après avis de :

Pierre-Noël GIRAUD, Professeur, Ecole des Mines de Paris
Philippe VERVIER, Directeur de recherche, CNRS, Toulouse

devant la commission d'examen formée de:

Jean-François BONNET, Maître de Conférences, Université Bordeaux 1
Michel COMBARNOUS, Professeur, Université Bordeaux 1
Pierre-Noël GIRAUD, Professeur, Ecole des Mines de Paris
Jean-Rodolphe PUIGGALI, Professeur, Université Bordeaux 1
Philippe VERVIER, Directeur de recherche, CNRS, Toulouse

N° d'ordre : 3050

THESE

présentée à

L'UNIVERSITE BORDEAUX 1

ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGENIEUR

par **Xavier GOOSSENS**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPECIALITE : MECANIQUE

**LA MAITRISE DE LA DEMANDE EN EAU ET EN ENERGIE
EN AGRICULTURE IRRIGUEE :
DE L'EVALUATION DES ENJEUX
A LA PROPOSITION D' ACTIONS CIBLEES**

Soutenue le 4 novembre 2005

après avis de :

Pierre-Noël GIRAUD, Professeur, Ecole des Mines de Paris
Philippe VERVIER, Directeur de recherche, CNRS, Toulouse

devant la commission d'examen formée de:

Jean-François BONNET, Maître de Conférences, Université Bordeaux 1
Michel COMBARNOUS, Professeur, Université Bordeaux 1
Pierre-Noël GIRAUD, Professeur, Ecole des Mines de Paris
Jean-Rodolphe PUIGGALI, Professeur, Université Bordeaux 1
Philippe VERVIER, Directeur de recherche, CNRS, Toulouse

Donner et recevoir ce sont bien deux concepts à équilibrer et qui peuvent se réapprendre chaque jour, tant leur mise en œuvre demande d'humilité et de volonté. La diversité des expériences et des stratégies d'échange est telle, dans notre monde vivant, que les doctrines peuvent pâlir devant l'instant.

Dans ce sens, Michel COMBARNOUS m'apportant rigueur, écoute et confiance et, Jean-François BONNET, m'impliquant depuis 1999 dans les recherches eau-énergie et contribuant avec conviction à renforcer la dimension pratique de mon travail, m'ont fait bénéficier d'un encadrement de thèse dual et constructif que j'ai beaucoup apprécié. Je les en remercie chaleureusement.

Tout aussi constructives furent les remarques des deux rapporteurs de ma thèse, Pierre-Noël GIRAUD et Philippe VERVIER que je tiens à remercier pour la pertinence de leurs questions et l'esprit positif avec lequel ils ont lu ce document à l'interface de plusieurs disciplines.

Merci à Jean-Rodolphe PUIGGALI, directeur du TREFLE, pour avoir accepté de présider mon jury de thèse et pour son intérêt pour mon sujet en marge du cœur des préoccupations du laboratoire. Je tiens également à saluer sa simplicité et sa franche générosité qui contribuent pour beaucoup à la bonne ambiance générale qui règne au TREFLE.

Au sein de l'ADEME qui m'a soutenu financièrement pendant ces trois années de recherche, je tiens à exprimer toute ma gratitude à Bernard CORNUT, pour son soutien dans mon parcours depuis 1999 et pour m'avoir mis en contact avec l'association DEMETER alors présidée par Alfi MALEK.

Alfi m'a soutenu de mes premiers pas sur le terrain dans le delta égyptien à la plaine du Gharb au Maroc, je l'en remercie avec une pensée amicale. Aujourd'hui, les membres de DEMETER renouvellent leur confiance en me permettant de réaliser une première mission au Sénégal, en Casamance. Je leur en suis profondément reconnaissant.

Ce tour des « partenaires historiques » des travaux sur l'énergie et l'« irrigation » ne serait pas complet sans que soit adressé de vifs remerciements à l'équipe irrigation du CEMAGREF et particulièrement à Bruno MOLLE, Sami BOUARFA et Pierre RUELLE. Un grand merci également à Michel COLOMBIER pour sa contribution à nos réflexions depuis 1999 et à David CAPES pour ses conseils méthodologiques.

J'ai aussi beaucoup de gratitude pour Abdelkrim KRIRA qui m'a accueilli au sein de l'INRA de Kénitra et dans sa famille. Je salue son expérience, son sens pratique, sa connaissance fine des administrations et de l'agriculture dans le Gharb. Merci aussi à la chambre d'agriculture du Lot-et-Garonne et plus particulièrement à Philippe PACE pour son aide dans la prise de contact avec les exploitants de ce département. Un grand merci aux agriculteurs du Gharb et du Lot-et-Garonne qui m'ont accueilli sur leurs exploitations et m'ont permis de garder les pieds sur terre.

En thèse, il n'y a pas de réelle nécessité de tuer le temps, mais il faut bien admettre que dans les bureaux aveugles spécialement conçus pour cristalliser l'attention des apprentis docteurs, les bols d'air de toutes natures sont toujours bienvenus. Ainsi nous nous inventâmes des « mondes réels possibles » à base de psychologie sociétale avec Anne PRIEUR, de militantisme bédéphile avec Yoann VERNAT ou de militantisme du thésard irrésolu avec Jérôme LUX, de simplicité maternelle avec Céline MANDALLENA ou de simplicité confraternelle et rocheuse avec José-Manuel ROZOT et Christophe DEVEL, de toute puissance de la rationalité sur le Goban comme dans la vie avec Raphaël CHERRIER, de sensibilité aux institutions et aux cultures avec Elena PALOMO. Mais, finalement de tous les mondes visités, le plus abrupt et le plus sensible est sûrement celui des bords de Garonne que j'arpente toujours émerveillé par la richesse du réel en compagnie de Cécile RABIER.

Je tiens à remercier chaleureusement Nicole pour son soutien et son accueil dans la dernière ligne droite de la rédaction. Les quelques jours passés dans les Pyrénées en compagnie du couple COMBARNOUS, bien que fort studieux, furent très agréables.

Enfin, si le laboratoire est sans fenêtre pour ceux qui le fréquentent, il l'est aussi pour ceux qui lui sont extérieurs. Ceux là, mes chers parents, Claudine et Clément, mon frère, Grégori, mes grands parents, Céleste et Paul, Andrée et Jacques, et, ma chère famille, physiquement proches, ne voient que les ombres sur mon visage et par leur présence et par des nourritures terrestres ils m'accompagnent avec entrain. Merci, tous les jours merci.

Talence le 4 novembre 2005

INTRODUCTION	1
PARTIE 1 : DEMARCHE GENERALE et PROBLEMATIQUE	3
1 Un couplage nécessaire entre des études de terrain et l'effort méthodologique	5
1.1 Agriculture irriguée : les termes d'un problème complexe.....	5
1.2 Nécessité, apports et présentation des études de terrain	19
1.3 Objectifs et méthodologie	27
PARTIE 2 : ANALYSE et MODELISATION	33
2 Contraintes et besoins de l'alimentation et de l'irrigation	35
2.1 Contraintes du système d'approvisionnement alimentaire.....	35
2.2 Contraintes de la production agricole végétale	45
2.3 Contraintes de l'irrigation	61
3 Fonctions de l'alimentation et de l'agriculture irriguée	71
3.1 Nourrir les hommes	71
3.2 Produire les végétaux.....	79
3.3 Mobiliser les ressources en eau et irriguer	81
4 Objectifs de l'alimentation et de l'irrigation	99
4.1 Efficacité de l'approvisionnement alimentaire.....	99
4.2 Durabilité physique de la mobilisation des ressources	103
4.3 Productivité de l'agriculture irriguée	109
PARTIE 3 : PROPOSITION D'OUTILS POUR L'EVALUATION	111
5 Des outils pour quoi faire ?	113
6 Outil d'évaluation des contextes nationaux	115
6.1 Caractérisation de quatre contextes et hiérarchisation des objectifs.....	115
6.2 Description des critères de classement.....	119
6.3 Elaboration et utilisation des fiches pays.....	121
7 Un programme local d'audit pour améliorer les performances	131
7.1 Préparation du programme	131
7.2 Montage	133
7.3 Réalisation	141
7.4 Restitution et valorisation des résultats	145
8 Démarche de diagnostic eau – énergie de l'exploitation	153
8.1 L'étude préparatoire, une étape pour structurer la collecte de données	153
8.2 La collecte des données pour le diagnostic approfondi.....	157
8.3 Analyse des performances	169
8.4 Liste des actions à examiner.....	177
8.5 Conditions de réalisation et évaluation des actions.....	183
CONCLUSION GENERALE	193
GLOSSAIRE, NOMENCLATURE et CONVERSIONS	199
BIBLIOGRAPHIE	205
Bibliographie générale.....	205
Banques de données consultées.....	211
Publications et contributions scientifiques de l'auteur	212
FICHES PAYS	213

INTRODUCTION

Comment définir pour un contexte particulier ou dans le cadre d'une approche globale le poids à accorder à **l'équité**, à la **durabilité de mobilisation des ressources** et à la **rentabilité** ? Si cette question générale peut être, et doit même, souvent, être posée dans le cadre de nombreuses activités humaines, nous pensons qu'elle est particulièrement pertinente dans le domaine de l'agriculture irriguée.

Tout d'abord, l'agriculture irriguée participe de manière significative et croissante à l'approvisionnement alimentaire et l'accès à l'alimentation est loin d'être réparti de façon équitable. Deuxièmement, l'agriculture irriguée doit tendre vers la rentabilité comme toute autre activité qui implique des hommes, des investissements et des flux de matière et d'énergie.

Troisièmement, enfin, l'agriculture irriguée mobilise des sols, des ressources en eau et des ressources en énergie en quantités significatives, tout du moins pour les ressources en sols (18 % des surfaces cultivées) et pour les ressources en eau (70%). Concernant la consommation d'énergie, l'agriculture et l'irrigation contribuent également pour une part marginale à la consommation d'énergie totale. L'irrigation est devenue un facteur de production sans lequel il serait difficile de nourrir la population mondiale avec le niveau d'efficacité actuel, même s'il peut être considéré comme insatisfaisant. Trois études, réalisées entre 2000 et 2003 (Goossens, 2000, Goossens et Bonnet, 2001 et 2003a), ont permis de mettre en évidence d'une part un couplage fort et qui a tendance à se renforcer entre mobilisation d'eau et demande en énergie et d'autre part des marges de manœuvres techniques pour réduire la demande en eau et en énergie de l'irrigation.

Les connaissances et les compétences développées au cours des dernières décennies permettent, assez souvent, d'évaluer séparément les trois aspects mentionnés ci-dessus, équité, rentabilité et durabilité, avec plus ou moins de finesse. Cependant, à grande échelle comme à petite échelle, il n'y a, à notre connaissance, que très peu d'approches méthodologiques, sur des domaines ou des espaces précis, où les trois aspects sont, ensemble, bien pris en compte.

En outre, si on suppose qu'une amélioration de l'équilibre entre ces trois directions principales peut être proposée sur la base d'une approche objective ou tout du moins argumentée, il convient encore de définir les conditions et les moyens à mettre en œuvre pour y parvenir.

Dans ce document, une **première partie**, courte, a pour but de décrire les besoins et le cheminement adopté pour élaborer la démarche. On y décrit tout d'abord les termes de la complexité de l'étude, les flux à prendre en compte, les échelles à examiner et les acteurs impliqués. Ensuite, une description sommaire est faite des deux études de terrain réalisées et de trois autres cas examinés. Les principaux éléments de contexte associés aux zones étudiées sont présentés. Enfin, les principales orientations méthodologiques retenues pour analyser les contextes et élaborer des outils sont évoquées.

Dans la **deuxième partie**, sont décrites les principales connaissances à utiliser pour évaluer les besoins en eau et en énergie de l'agriculture et plus particulièrement de l'irrigation.

On décrit successivement les contraintes, les fonctions, et les objectifs de l'agriculture irriguée. Les contraintes sont exprimées en termes de besoins et de ressources. Les fonctions sont présentées comme des « briques » ou des ensembles de « briques » mis en œuvre par les hommes pour réaliser l'approvisionnement alimentaire. Afin de bien situer l'apport et le rôle de l'irrigation dans un contexte plus général, les contraintes et les fonctions sont déclinées de manière succincte pour l'approvisionnement alimentaire et la production agricole dans son ensemble puis, de façon plus détaillée, pour l'irrigation. Enfin, le travail sur les objectifs consiste à identifier des couples de variables et de valeurs seuils évaluables qui permettent de rendre compte de l'efficacité, de la durabilité et de la rentabilité des pratiques en fonction des contextes.

Enfin, dans la **troisième partie**, on propose de développer trois outils d'évaluation pour caractériser les contextes, identifier des actions à réaliser et apprécier leur portée. L'élaboration de ces outils s'appuie sur les études de terrain et utilise les résultats obtenus dans la deuxième partie. Le premier outil proposé consiste à décrire à l'échelle d'un territoire, un pays par exemple, les besoins et les potentialités de l'agriculture irriguée en fonction de la population et des ressources disponibles. Un second outil consiste à décrire les principaux aspects à prendre en compte pour élaborer un programme de diagnostic à une échelle plus réduite. Il s'agit notamment de définir des actions techniques cibles envisageables au niveau des exploitations agricoles pour servir des objectifs de dimension territoriale. Le dernier outil que l'on propose de développer consiste à évaluer les performances des systèmes et des pratiques de l'irrigation à l'échelle de l'exploitation et à proposer des actions d'amélioration adaptées.

PARTIE 1 : DEMARCHE GENERALE et PROBLEMATIQUE

1 Un couplage nécessaire entre des études de terrain et l'effort méthodologique

1.1 Agriculture irriguée : les termes d'un problème complexe

- 1.1.1 Alimentation, eau et énergie
- 1.1.2 L'agriculture irriguée : objectifs et questionnements
- 1.1.3 Un problème sur plusieurs échelles
- 1.1.4 Un jeu d'acteurs aux rôles variés

1.2 Nécessité, apports et présentation des études de terrain

- 1.2.1 Intérêt et nécessité de l'analyse de cas concrets
- 1.2.2 Deux études de terrain réalisées...
- 1.2.3 ... et trois cas concrets examinés

1.3 Objectifs et méthodologie

- 1.3.1 Objectifs généraux
 - 1.3.2 Les objets étudiés
 - 1.3.3 Les éléments de méthode retenus pour l'analyse des systèmes
-

Figure 1- 1 – Répartition de la production agricole végétale exprimée en énergie entre les différents usages (2002) (d’après les données de production, les contenus énergétiques des aliments et la répartition entre usages – FAOSTAT, 2004)

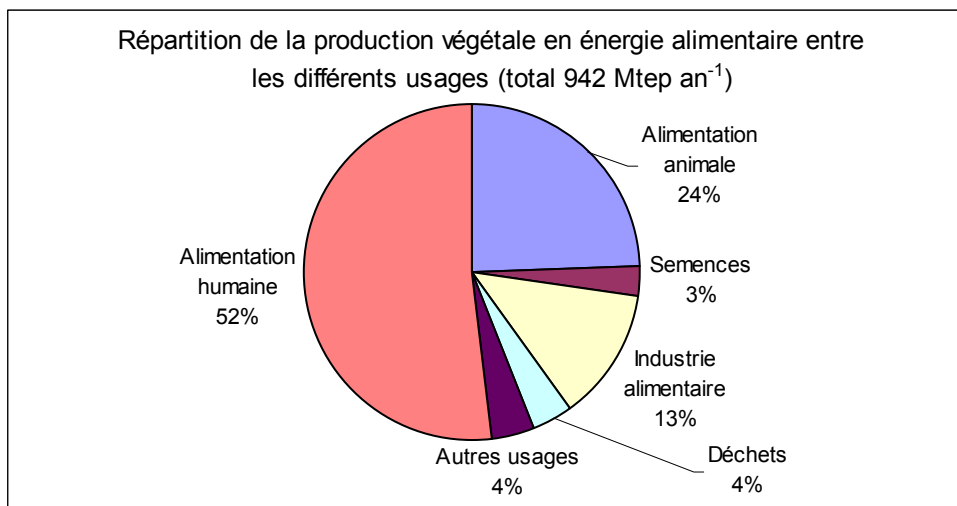
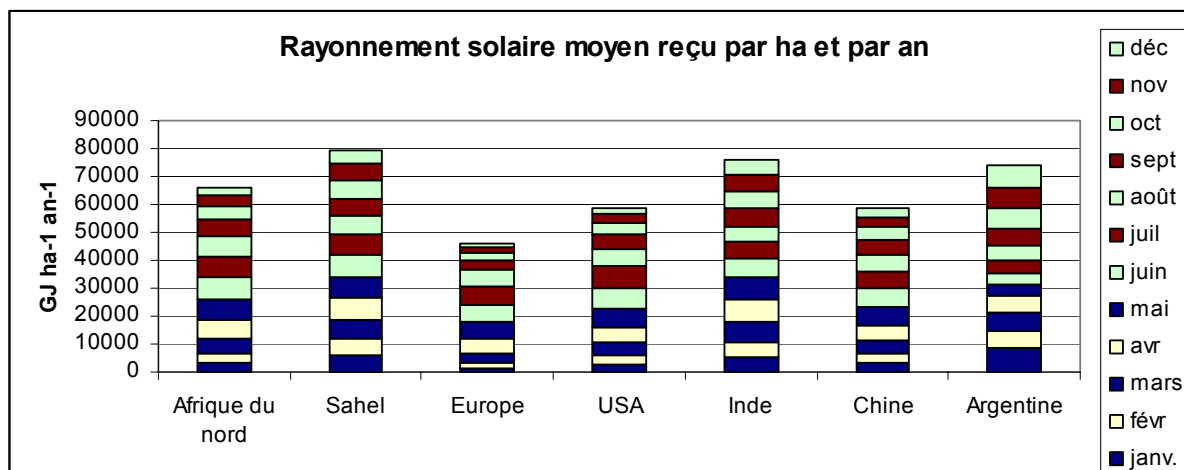


Figure 1 - 2– Energie solaire reçue par une surface horizontale d’un hectare au cours d’une année moyenne pour différentes zones du monde. Etablie d’après les cartes d’ensoleillement fournies par Royer et al., 1998



1 Un couplage nécessaire entre des études de terrain et l'effort méthodologique

1.1 Agriculture irriguée : les termes d'un problème complexe

1.1.1 Alimentation, énergie et eau

La production agricole, une production d'énergie utilisable par le corps humain

Si l'on néglige la production halieutique (1 %), la production agricole est la seule source d'énergie que peut utiliser le corps humain pour son fonctionnement. En 2002, avec une moyenne de 2804 kcal j⁻¹ hab⁻¹ pour les 6,2 milliards d'individus qui peuplent la planète, l'énergie disponible pour la consommation sous forme de produits alimentaires représentait 0,6 Gtep an⁻¹.

Par ailleurs, en utilisant les données statistiques de la FAO on peut calculer le contenu énergétique de la production agricole mondiale de produits d'origine végétale qui s'établit à 0,94 Gtep an⁻¹. Cette quantité d'énergie correspond à environ 10 % de la consommation d'énergie commerciale à l'échelle mondiale (9,4 Gtep an⁻¹ en 2002 – BP, 2004).

La différence entre la production et l'énergie disponible pour la consommation est due d'une part aux pertes occasionnées par le transport, la transformation et le stockage et d'autre part à la conversion de biomasse végétale en biomasse animale. La Figure 1- 1 donne la répartition de la production entre les différents usages.

Les énergies mobilisées par la production agricole

La principale source d'énergie de la production agricole est **le soleil** avec un flux annuel moyen d'environ 50000 GJ ha⁻¹ (Figure 1 - 2). C'est la seule source d'énergie utilisée directement par les végétaux avec un rendement maximum d'environ 0,5 % (Bonnet, 1998). Cependant le capteur solaire que constituent les surfaces cultivées peut présenter un rendement très variable en fonction notamment de la disponibilité en eau, en fertilisants et en fonction du potentiel de production des cultures et des variétés.

L'exploitant agricole intervient pour préparer les sols, réaliser la mise en culture, fournir aux cultures l'eau et les fertilisants dont elles ont besoin et récolter. **Le travail** de l'exploitant agricole, **l'énergie d'origine « commerciale »** mise en œuvre pour réaliser les différentes étapes de la pratique de l'agriculture, et l'énergie nécessaire pour la production des fertilisants, doivent également être pris en compte comme des intrants énergétiques de la production agricole. Par énergie commerciale, on désigne l'ensemble des flux énergétiques qui ne sont pas autoproduits par les acteurs et dont la mobilisation implique un échange d'argent.

Par la suite on distingue l'énergie alimentaire nécessaire pour nourrir les agriculteurs des énergies commerciales impliquées dans la production. La quantité et la répartition des consommations d'énergie pour réaliser ces tâches varient sensiblement en fonction des conditions physiques et du niveau d'intensification de la production.

Figure 1-3 – Répartition des flux d'eau douce continentale et utilisation dans les activités humaines (FAO, 1996 b). Les « eaux vertes » correspondent aux flux consommés par le couvert végétal par évapotranspiration, les « eaux bleues » sont les flux disponibles dans le réseau hydrographique et les ressources souterraines (* Schiklomanov, 1998)

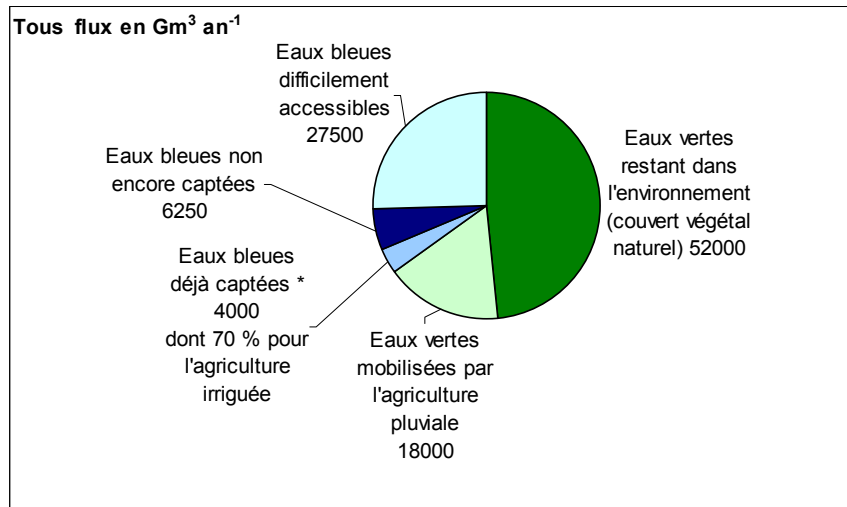


Figure 1-4 – Ressource en eau renouvelable par zone géographique (Goossens et Bonnet, 2001)

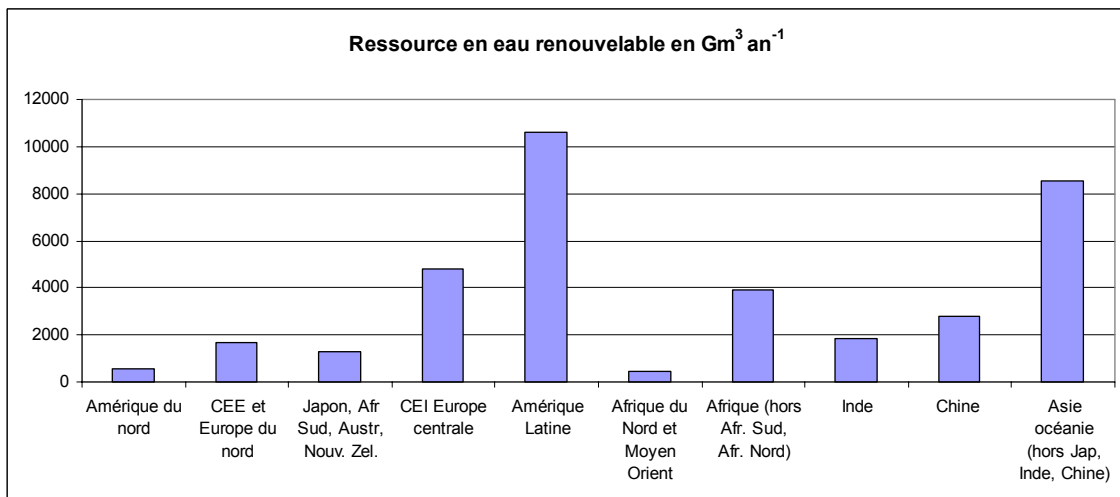
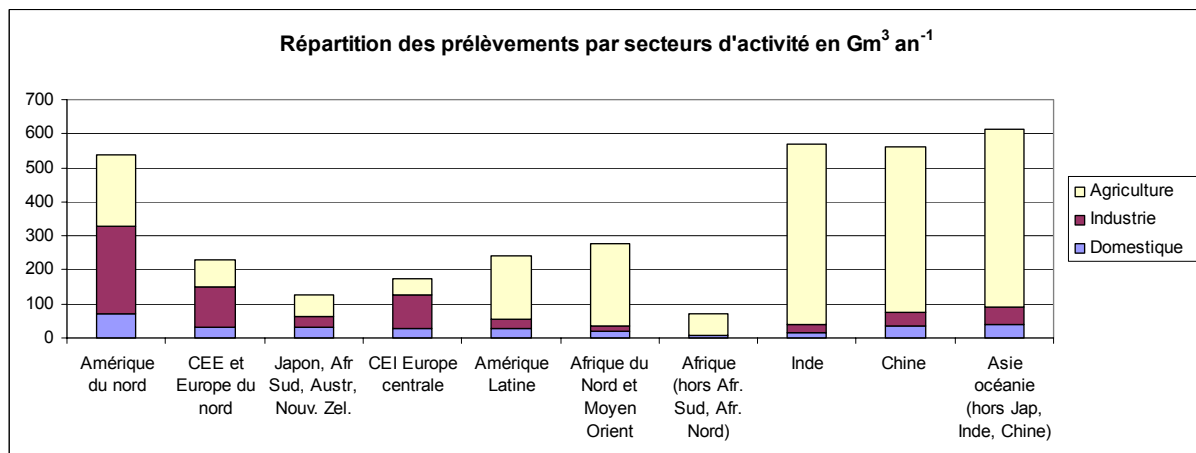


Figure 1-5 – Répartition des prélèvements par secteur d'activité et par zone géographique (Goossens et Bonnet, 2001)



Concernant la place de l'agriculture dans la consommation d'énergie de type commercial, elle reste relativement modeste. En effet d'après le WRI (World Resources Institute), la part de l'agriculture dans la consommation d'énergie à l'échelle mondiale s'établissait à 2,9 % en 1999. On remarque cependant que cette valeur ne concerne que le secteur productif et qu'elle n'intègre pas les coûts énergétiques des transports et des intrants à fort contenu énergétique, que représentent notamment les engrais. En outre, cette valeur moyenne masque de fortes disparités entre les pays. Ainsi, dans certains pays comme l'Inde, la contribution du secteur agricole dans la consommation d'énergie primaire totale à l'échelle nationale peut être supérieure à 15 % (Goossens et Bonnet 2001).

En revanche, on observe que, dans de nombreux pays, la pratique de l'agriculture est devenue entièrement dépendante de la disponibilité d'énergie commerciale. Cette évolution résulte de l'abandon des pratiques traditionnelles au profit de l'utilisation des machines qu'il s'agisse de machinisme agricole ou d'irrigation.

L'eau mobilisée par la production agricole

La grande majorité ($70000 \text{ Gm}^3 \text{ an}^{-1}$) des eaux de pluies qui arrivent sur les continents ($110000 \text{ Gm}^3 \text{ an}^{-1}$) est consommée directement par le couvert végétal (Figure 1-3). Une part significative de cette eau ($18000 \text{ Gm}^3 \text{ an}^{-1}$), qualifiée d'eau verte, est utilisée pour la production agricole pluviale. Les $40000 \text{ Gm}^3 \text{ an}^{-1}$ restant alimentent le réseau hydrographique de surface et les nappes souterraines. Les estimations et projections des volumes prélevés pour les activités humaines à l'échelle de la planète en 2000 se sont échelonnées entre $8400 \text{ Gm}^3 \text{ an}^{-1}$ Falkenmark et Lindh, 1974) et $4000 \text{ Gm}^3 \text{ an}^{-1}$ (Schiklomanov, 1998, WRI, 1990). Les estimations ont tendance à se stabiliser autour de cette dernière valeur.

D'après la FAO, l'agriculture irriguée mobilise environ 70% des prélèvements opérés par l'homme soit $2800 \text{ Gm}^3 \text{ an}^{-1}$. En outre elle permet de réaliser environ 40% de la production agricole sur seulement 17 à 18% des surfaces cultivées.

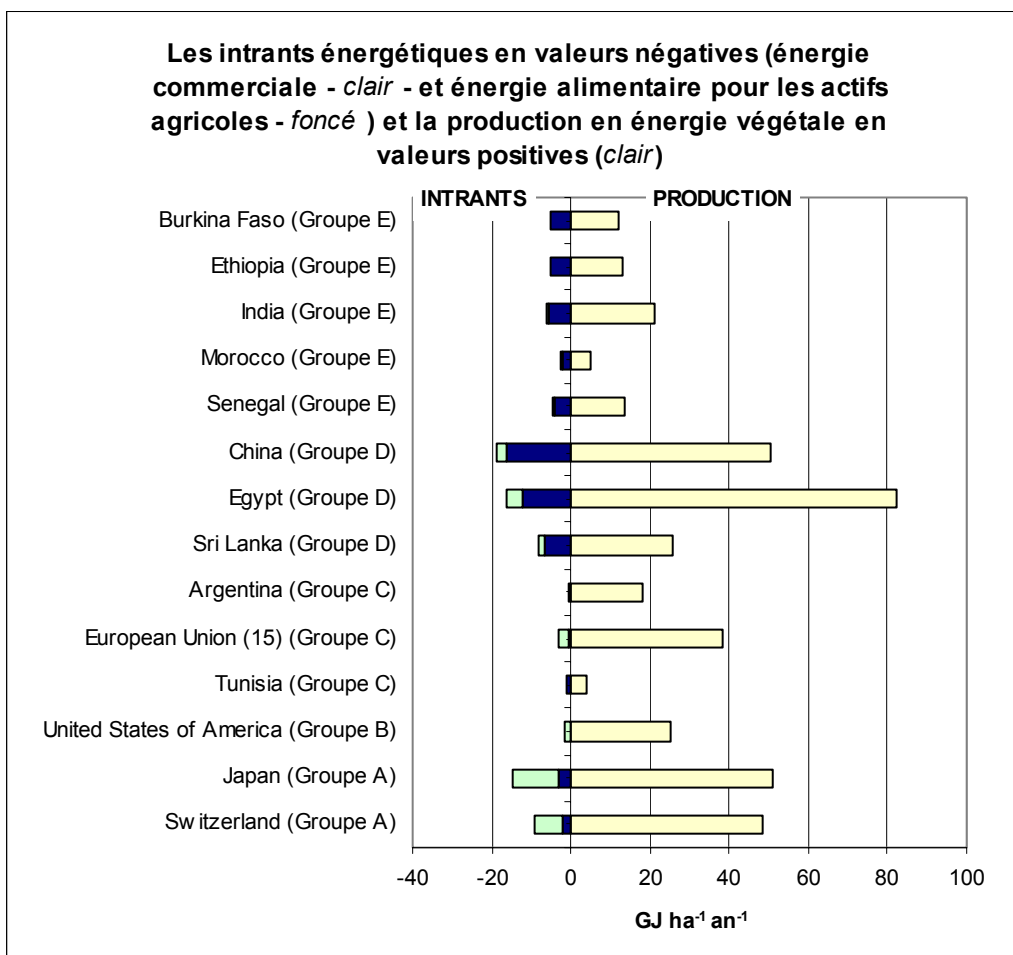
Cependant, la disponibilité est très variable d'un territoire à l'autre. La Figure 1-4 donne une estimation des ressources renouvelables en eau à l'échelle de grandes zones géographiques dont les populations sont assez différentes les unes des autres. La zone Afrique du Nord et Moyen Orient présente les plus faibles disponibilités en ressources renouvelables. Cette situation est d'autant plus préoccupante que, dans cette zone, la croissance démographique est encore très élevée ce qui se traduit par une demande alimentaire croissante.

La Figure 1-5 donne une estimation de la répartition des prélèvements par secteur d'activité. En mettant en relation la Figure 1-4 et la Figure 1-5, on observe deux éléments marquants. Premièrement, l'Afrique, en proie à des problèmes chroniques d'approvisionnement alimentaire, ne mobilise qu'une part relativement faible (environ 2%) de la ressource disponible. Cette remarque permet de souligner qu'un potentiel environnemental existe et que le frein au développement de l'irrigation n'est pas nécessairement la disponibilité de la ressource en eau. Deuxièmement, à l'opposé, la situation de l'Afrique du Nord et du Moyen Orient ainsi que la situation de l'Amérique du Nord apparaissent relativement préoccupantes par la part importante des prélèvements dans la ressource renouvelable.

Deux systèmes de production agricole contrastés

En première approche, les systèmes de production agricole peuvent être classés en systèmes agricoles **traditionnels** et systèmes de production de types **industriels**.

Figure 1- 6 – Evaluation des intrants et des productions énergétiques par hectare de terres cultivées en $GJ\ ha^{-1}\ an^{-1}$. La classification en groupes (A à E) et les intrants en énergie fossile sont extraits de Conforti et Giampietro (1997). L'évaluation de la consommation d'énergie alimentaire des actifs agricoles par hectare se base sur la DEA moyenne (Disponibilité Energétique Alimentaire) pour chaque pays, le nombre d'actifs agricoles et la surface cultivée (terres arables et cultures permanentes). La production d'énergie agricole est calculée à partir des productions en végétaux et de leur contenu énergétique spécifique à chaque pays (FAOSTAT, 1995)



Les **premiers** sont caractérisés par des niveaux d'intensification, d'intrants et d'impacts environnementaux relativement faibles. Les coûts énergétiques de la production dans ces systèmes sont essentiellement liés à l'énergie alimentaire nécessaire pour nourrir les actifs agricoles. Ces systèmes présentent deux sources majeures de vulnérabilité. Premièrement, ils sont limités en termes de diversité du régime alimentaire et fortement soumis à la saisonnalité de la production. Il en résulte **un risque de carences alimentaires** important. Deuxièmement, dans ces systèmes, les populations n'ont pas de ressources économiques suffisantes pour **faire face aux mauvaises récoltes**. Par ailleurs, de tels systèmes n'apportent pas de solutions à la demande alimentaire croissante des zones urbaines. On remarque également que les producteurs sont très pauvres et qu'ils n'ont pas les moyens financiers d'investir dans les intrants qui leur permettraient d'augmenter les rendements de leurs exploitations. Il semble que, sans aides extérieures, les systèmes traditionnels n'ont pas les moyens de se développer.

A l'opposé des systèmes traditionnels décrits ci-dessus, on trouve le système de production de type **industriel**. Dans ce type de système, on trouve des grandes zones de production agricole en monoculture, très performantes en termes de rendement par unité de surface (équivalent à un rendement de conversion de l'énergie solaire - Bonnet, 1998) et/ou par actifs agricoles. L'énergie « commerciale » requise pour faire fonctionner ces systèmes tant pour la production que pour le transport des denrées représente une part significative du contenu énergétique de la production agricole. En outre, ce mode de production peut impliquer des dégradations de l'environnement significatives en termes d'impact sur les ressources en eau, de biodiversité des variétés cultivées, et de dégradation des sols (Conforti et Giampietro, 1997). En revanche, lorsque l'on compare la consommation d'énergie de la production agricole avec celles des autres secteurs d'activité elle apparaît marginale. Il convient cependant de remarquer qu'à l'échelle de l'exploitation agricole le coût de l'énergie fait partie des premiers postes en termes de charge de production.

En 1997, Conforti et Giampietro comparent, selon une lecture énergétique, les intrants et les productions de l'agriculture pour 75 pays. Ils proposent une classification entre les différents pays qui permet d'établir un lien fort entre la production, les apports en énergie commerciale, le travail des agriculteurs et les surfaces disponibles pour l'agriculture. En respectant la classification adoptée, nous proposons dans la Figure 1- 6 une représentation adaptée des intrants et de la production pour 14 pays. Cette représentation met en évidence les différences significatives entre les différents systèmes de production.

1.1.2 L'agriculture irriguée : objectifs et questionnements

L'irrigation qui est naturellement liée au champ thématique de la production agricole et à celui de la mobilisation des ressources en eau doit contribuer à satisfaire une demande alimentaire croissante au moyen d'une mobilisation rationnelle des ressources disponibles. Par ailleurs, la réalisation et l'utilisation des infrastructures d'irrigation impliquent des investissements et des coûts de fonctionnement dont la rentabilité dépend des performances techniques elles-mêmes couplées avec l'efficacité énergétique des systèmes. Il en résulte que l'irrigation doit atteindre les trois grands objectifs suivants :

- [1]** contribuer à améliorer la production agricole en vue de garantir un niveau satisfaisant d'approvisionnement alimentaire des populations,
- [2]** mobiliser les ressources de façon durable du point de vue quantitatif et qualitatif,
- [3]** garantir la viabilité économique de la pratique de l'agriculture irriguée, notamment par la recherche d'une efficacité technique optimale.

Encadré 1-1 - Liste de questions classées suivant leur portée (1/2)

A l'échelle de l'exploitation

Q E1 - Quelle est l'influence des choix techniques et des dimensionnements des éléments d'infrastructures sur l'efficiencia de mobilisation de l'eau et de l'énergie ? **[2 – 3]**

Q E2 - Quelle est l'influence du mode de pilotage sur l'efficiencia de mobilisation de l'eau et de l'énergie ? **[2 – 3]**

Q E3 - La disposition des infrastructures implique-t-elle des contraintes particulières en matière de choix culturaux ? **[1 – 3]**

Q E4 - Quelles sont les interventions prioritaires sur les infrastructures qui permettent de réduire les coûts de l'irrigation tout en conservant ou en améliorant la production ? **[1 – 3]**

Q E5 - Quelle est la part de l'irrigation dans le coût de la production agricole ? **[3]**

Q E6 - Dans le coût global de l'irrigation, quelles sont les parts respectives des investissements et des coûts de fonctionnements ? **[3]**

Q E7 - Comment s'établit l'équilibre entre main d'œuvre, mécanisation et mobilisation d'énergie ? **[3]**

Q E8 - Quelle est l'influence des contraintes d'accès aux ressources en eau sur l'efficacité de l'irrigation en termes de choix de culture, de production et de mobilisation de l'eau ? **[1 - 2 - 3]**

Q E9 - Dans quelles mesures les contraintes propres aux réseaux collectifs de distribution d'eau affectent-elles le pilotage de l'irrigation et l'efficacité de mobilisation des ressources en eau et en énergie ? **[2 – 3]**

Q E10 - Quels avantages et inconvénients à la pratique du stockage de l'eau au niveau des exploitations ? **[1 – 2 – 3]**

Q E11 - En matière de choix d'assolement, peut-on définir des éléments d'aide à la décision grâce à une lecture des besoins et des disponibilités en eau ? **[1 – 2 – 3]**

En fonction des jeux de contraintes présents dans les différents contextes étudiés, l'approche proposée doit permettre d'aider à la décision, c'est-à-dire de donner un niveau de priorité à chacun de ces trois objectifs, de définir les différents couplages et les relations qui existent entre ces objectifs ainsi que la nature et l'ampleur des développements à mettre en œuvre pour les atteindre. Le développement d'une telle approche soulève des questions qui font référence aux domaines de l'évaluation énergétique, de la gestion des ressources en eau, de l'agriculture, de l'alimentation, et de l'optimisation technico-économique et ce, parfois, à différentes échelles géographiques. Un ensemble de questions issues de la transposition des trois objectifs sur des cas concrets est proposé ci-dessous.

Il est à noter que les questions proposées (Encadré 1-1) n'ont ni la prétention de constituer un ensemble exhaustif, ni celle d'être complètement indépendantes les unes des autres. Elles correspondent plutôt aux formulations souvent adoptées par des décideurs et/ou des utilisateurs et ont constitué, pour nous, un cadre général qui nous a permis d'affiner nos réflexions.

Ces questions sont classées en fonction de l'échelle sur laquelle elles portent, de l'échelle de l'exploitation jusqu'à l'échelle internationale (une description détaillée des échelles qui peuvent présenter un intérêt pour le sujet est présentée au § 1.1.3). Afin d'identifier les types de couplage qui peuvent exister entre les trois objectifs décrits, l'affiliation en termes d'objectifs de chaque question est indiquée par des indications entre crochets conformément à la notation ci-dessus.

L'essentiel de la problématique consiste à décrire les principaux développements à mettre en œuvre en termes d'infrastructures, d'organisations et de savoir faire pour que les populations puissent satisfaire leurs besoins alimentaires de manière durable dans des contextes physiques et socioéconomiques variés.

1.1.3 Un problème sur plusieurs échelles

Dans un système complexe, plusieurs groupements d'objets présentant une unité cohérente peuvent être définis. L'étude de ces groupements permet de décrire des aspects particuliers de la problématique générale. Chaque groupement d'objets peut être associé à une extension spatiale que l'on appelle **l'échelle d'observation**. Dans les problèmes environnementaux et plus particulièrement dans les aspects liés aux ressources en eau, les échelles délimitées par des frontières physiques semblent les plus pertinentes. Cependant les échelles dont les frontières présentent un caractère administratif (échelles territoriales) ont une importance tout aussi décisive dans la description et l'évaluation des flux. En effet, ces échelles peuvent présenter une unité de projet, une unité culturelle, une unité politique, législative ou organisationnelle qui sont autant de facteurs indispensables à l'étude de systèmes complexes. On propose de détailler ci-dessous les différentes échelles qui sont susceptibles de présenter un intérêt pour la description des problèmes de l'irrigation.

Le groupement d'objets qui se situe à la base de l'activité « agriculture irriguée » est le trio « **sol – plante – atmosphère** ». L'extension spatiale de ce groupement est un volume qui contient une plante et son espace de vie. La dimension de ce groupement est de l'ordre de 1 m^3 . C'est l'échelle de description des phénomènes de croissance de la plante, de captage de l'eau par le système de racines, et d'évapotranspiration.

Encadré 1-1 - Liste de questions classées suivant leur portée (suite 2/2)

A l'échelle du bassin versant ou du pays

Q T1 - La lecture énergétique apporte-t-elle des éléments d'arbitrage pertinents pour le choix des zones de développement de l'irrigation, des infrastructures et des ressources en eau ? **[2 - 3]**

Q T2 - Dans le cas des zones où les prélèvements sont majoritairement d'initiative privée, comment suivre et gérer la mobilisation de la ressource en eau ? Le suivi des consommations d'énergie peut-il être utile pour le suivi et la régulation de la mobilisation des ressources en eau ? **[2]**

Q T3 - Dans le cas des zones rurales à forte densité de population, existe-t-il des outils d'évaluation utilisant la lecture énergétique qui apportent des éléments d'arbitrage pour la gestion des concurrences d'usages ? **[1 - 2 - 3]**

Q T4 - Dans quelle mesure l'extension du réseau de distribution d'électricité favorise-t-elle le développement de l'irrigation d'initiative privée ? **[2 - 3]**

Q T5 - Dans les zones où l'économie est faible, l'utilisation des énergies commerciales non subventionnées est-elle viable pour l'irrigation ou représente-t-elle un frein ? **[1 - 3]**

Q T6 - Les alternatives aux énergies conventionnelles (éolienne, bioénergie, énergies solaires) présentent-elles des caractéristiques technico-économiques adaptées aux zones à économies faibles ? **[1 - 3]**

Q T7 - La fabrication locale du matériel de production d'énergie (énergies renouvelables), de motorisation, de pompage et d'irrigation est-elle faisable et sous quelles conditions ? **[3]**

Q T8 - Quels sont les vecteurs privilégiés à utiliser ou à développer pour diffuser des pratiques efficaces et durables ? **[2 - 3]**

Q T9 - Quels vecteurs privilégiés à utiliser ou à développer pour réaliser le suivi et l'aide au pilotage de l'irrigation ? **[2 - 3]**

Q T10 - Quels sont les vecteurs privilégiés à utiliser ou à développer pour améliorer l'accompagnement des exploitants en matière de stratégie d'investissement ? **[3]**

Q T11 - Existe-t-il des programmes scolaires adaptés dans les zones où l'agriculture a un rôle économique dominant ? Comment définir et favoriser la mise en œuvre de tels programmes ? **[1 - 3]**

Q T12 - Quels différents types de subvention mettre en œuvre pour favoriser la réalisation de tel ou tel objectif ? **[1 - 2 - 3]**

A l'échelle des grandes régions ou à l'échelle globale

Q I1 - Peut-on définir des stratégies de production alimentaire complémentaires entre pays et basées sur les caractéristiques du climat et des ressources en eau des différentes zones ? **[1 - 2 - 3]**

Q I2 - Dans des zones où les intérêts économiques à court terme sont « faibles », comment mobiliser les capitaux nécessaires au développement de l'agriculture irriguée ? **[1 - 3]**

Pour rendre compte de l'interaction entre les plantes et des aspects techniques de la répartition de l'eau entre ces dernières, l'échelle appropriée est celle de la **parcelle**. La parcelle constitue l'espace de vie de la culture constituée par l'ensemble des individus de même espèce et de même variété. Cette échelle, définie par un contour unique, porte sur une surface dont l'ordre de grandeur est l'hectare et contient au même titre que l'échelle du groupement « sol-plante-atmosphère », une partie aérienne et une partie souterraine. L'observation de la parcelle permet de décrire la concurrence entre les plantes de même espèce, la concurrence avec des plantes non désirées (adventices), l'homogénéité de répartition de l'eau et des engrais entre les plantes, l'évolution du bilan hydrique dans le sol en fonction des apports.

L'échelle directement supérieure est composée d'un ensemble de parcelles, d'infrastructures d'accès à l'eau et à l'énergie, de matières premières et de la main d'œuvre. Il s'agit de l'échelle de l'**exploitation agricole** dont la cohérence et l'unité s'organise autour d'un acteur, l'agriculteur, que l'on nommera aussi sans distinction l'exploitant agricole. L'exploitation agricole peut être décrite comme l'ensemble des terres, des cultures, des animaux, des infrastructures et des ressources dont la gestion relève de la responsabilité de l'exploitant agricole. L'extension en termes de surface de l'exploitation agricole peut être comprise entre un hectare et plusieurs centaines d'hectares. Cette échelle permet de décrire les caractéristiques techniques d'une partie des infrastructures de mobilisation de l'eau, certains choix en termes d'assolement ainsi que des marges de manœuvre pour ces points.

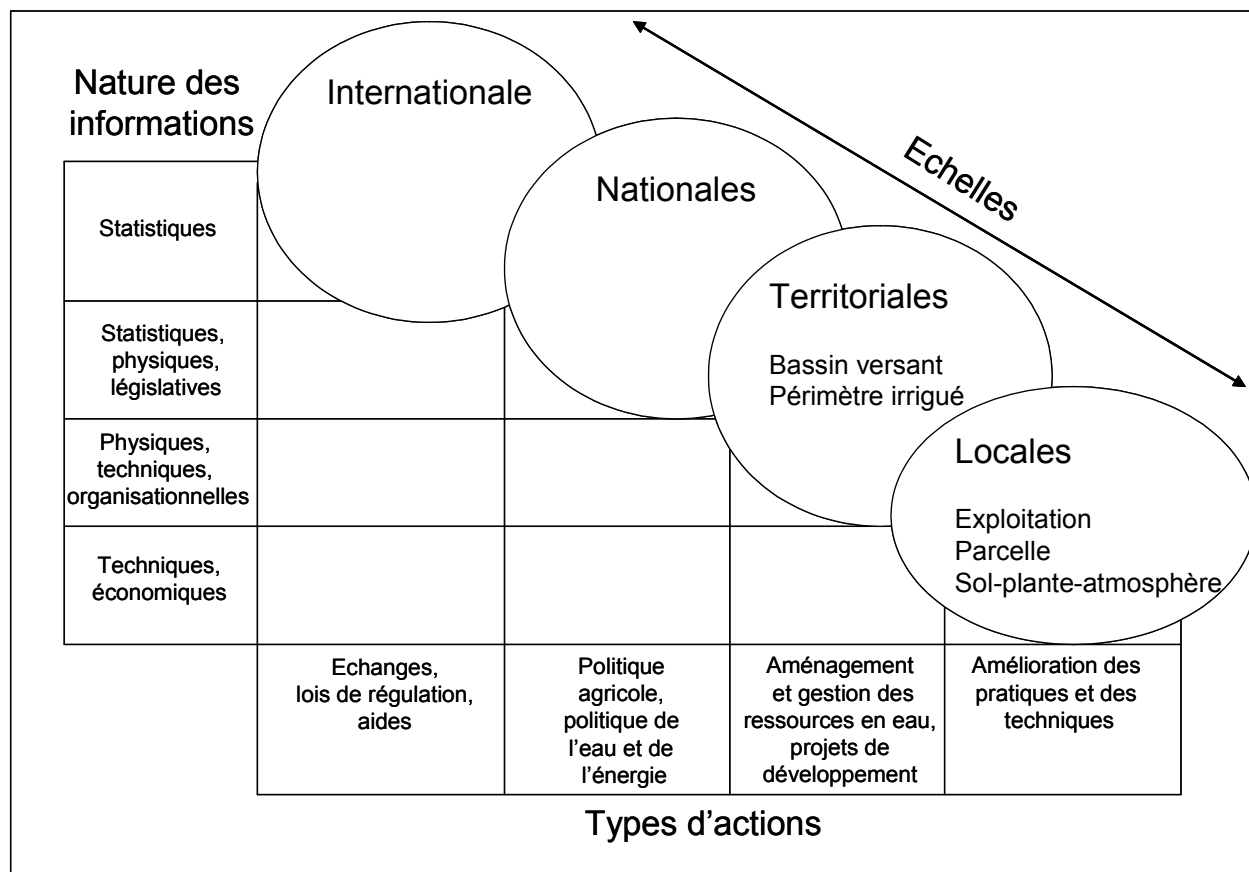
Pour certaines configurations de la ressource en eau (répartition peu avantageuse, dans le temps et/ou dans l'espace) des infrastructures de distribution de l'eau couvrant plusieurs exploitations doivent être développées. Les capacités des infrastructures et des ressources qu'elles mobilisent constituent de nouvelles contraintes de la répartition de l'eau.

L'unité et la cohérence de cette échelle du **périmètre irrigué** s'établissent autour de l'infrastructure et de ces règles d'utilisation. Cette échelle diffère de celle de l'exploitation par le fait qu'elle intègre de nombreux exploitants ainsi que d'autres acteurs, salariés de ces derniers ou salariés de l'Etat, dont le rôle est la gestion et l'entretien des ouvrages.

Lorsque les ressources en eau sont très sollicitées par les activités humaines, un approfondissement de la connaissance de leur vulnérabilité en termes de qualité et de quantité permet d'anticiper des risques et de prendre des mesures adéquates pour prévenir des problèmes de santé, d'environnement ou d'économie. Pour réaliser ces études, il est souvent utile de définir une unité géographique propre à la ressource en eau. La notion de **bassin versant** est particulièrement adaptée. Un bassin versant se définit par rapport à l'exutoire ou à une section quelconque d'un cours d'eau comme l'ensemble des points géographiques qui contribuent, lors de précipitations, à l'alimentation de la section du cours d'eau considérée. L'extension spatiale des bassins versants est très variable (de quelques centaines d'hectares à plusieurs millions d'hectares) suivant les cours d'eau considérés.

Les échelles **territoriales** dont l'unité s'organise autour d'aspects le plus souvent socioéconomiques, réglementaires et administratifs (loi, statistiques, stratégie de développement, prix, niveaux de vie et d'approvisionnement) sont relativement nombreuses. Les échelles nationales, départementales, communales, ... font partie de cette catégorie. Elles présentent souvent l'avantage de regrouper les résultats de recensement et de données statistiques concernant les populations et leurs activités, données utiles, pour caractériser des contextes, évaluer et prévoir l'évolution des besoins, établir des scénarios prospectifs.

Figure 1- 7 - Nature des informations accessibles et types d'actions envisageables pour chaque échelle d'observation et d'intervention



Certains grands ensembles regroupant plusieurs nations peuvent présenter une unité culturelle ou des points communs propres au climat et aux ressources en eau (les pays du Maghreb par exemple). L'échelle associée à ces ensembles est l'échelle **régionale**.

Bien que l'étude des flux à cette dernière échelle présente un intérêt limité du point de vue opérationnel, les points communs en termes de contraintes et de problématiques, notamment liées à l'eau, invitent les acteurs (décideurs et chercheurs) d'une même région à mettre en commun leurs savoir faire et leurs connaissances pour élaborer des stratégies communes.

Enfin, l'échelle **globale** qui considère la planète dans son ensemble, permet de traiter les grands cycles comme le cycle du carbone, le climat, certains aspects du cycle de l'eau ainsi que la répartition des ressources en énergie non renouvelables. En ce qui concerne les activités humaines, on peut recenser un certain nombre de règles ou de protocoles qui ont vocation à s'appliquer à l'échelle de la planète. Ce sont, par exemple, les règles des échanges économiques entre pays, la déclaration universelle des droits de l'homme ou le protocole de Kyoto.

Suivant les contextes, les enjeux et les stratégies propres aux différentes échelles peuvent présenter des influences variables sur la production alimentaire, la mobilisation des ressources en eau et l'efficacité énergétique. Il peut ainsi paraître pertinent en fonction du contexte de concentrer l'approche et les démarches sur telles ou telles échelles. La Figure 1- 7 présente la nature des informations et les types d'actions envisageables pour les principales échelles.

1.1.4 Un jeu d'acteurs aux rôles variés

L'agriculture et la gestion des ressources naturelles et des infrastructures mobilisent plusieurs organismes et plusieurs catégories d'acteurs dont les intérêts, les missions et les stratégies opérationnelles sont très diverses. La Figure 1- 8 reprend sous la forme d'une matrice les principaux échanges que l'on peut observer entre les différentes catégories d'acteurs.

Dans tous les contextes, l'**exploitant agricole** est l'acteur situé à la base de la production alimentaire. Il a en charge l'ensemble de la gestion de l'exploitation que ce soit sur les aspects techniques ou sur les aspects stratégiques. L'exploitant agricole prend les décisions et met en œuvre les moyens nécessaires aux pratiques culturales, au développement des infrastructures d'approvisionnement en eau à l'échelle de l'exploitation et à la distribution de l'eau sur les parcelles. Il doit garantir par ses choix la viabilité économique de l'exploitation et en cela s'adapter aux contraintes locales nationales et internationales des marchés. Les contraintes économiques à court terme auxquelles doivent faire face les agriculteurs occultent souvent les contraintes et les dynamiques à moyen terme propres aux ressources naturelles, en eau et en sol notamment.

Dans de nombreux cas, la mobilisation des ressources en eau ne peut être opérée directement par les exploitants. Ces cas se présentent notamment à chaque fois qu'un investissement lourd est requis pour rendre une ressource exploitable (retenues, transport de l'eau). Il convient alors de mettre en œuvre des mécanismes financiers de mutualisation des coûts, des risques et des services. Ces réalisations et leur gestion nécessitent des compétences particulières qui sont confiées aux **gestionnaires de périmètres irrigués**. On distingue deux types de gestion des périmètres irrigués : la gestion publique et la gestion privée. Dans le premier cas, les gestionnaires sont employés par l'Etat alors qu'en gestion privée, les employeurs sont des groupements d'agriculteurs ou des sociétés de service spécialisées.

Figure 1- 8 - Matrice des interactions entre les principaux groupes d'acteurs

Sens des flux :

	Agriculteurs	Groupements d'agriculteurs	Consommateurs de produits agricoles	Fournisseurs de matériel	Fournisseurs d'énergie	Fournisseurs d'eau d'irrigation	Gestionnaires des ressources en eau	Formateurs	Chercheurs
Agriculteurs	I	IA	P	A	A	A	A	IA	I
Groupements d'agriculteurs	IMO	I	I	A	AO	IO	IO	IA	AI
Consommateurs de produits agricoles	A	I	IA		A		A		AI
Fournisseurs de matériel	M	I		I	A	MI	I	IA	I
Fournisseurs d'énergie	En	En	En	En	I	En	I	I	I
Fournisseurs d'eau d'irrigation	Eau	I		AI	A	I	I	IA	I
Gestionnaires des ressources en eau	OS	I	I	I	I	IOS	I	I	AI
Formateurs	F	F		F		F		I	I
Chercheurs	I	I	I	I	I	I	I	I	I

Nature des flux échangés :

Argent	A
Energie	En
Eau	Eau
Formation	F
Information	I
Matériel et aménagements	M
Organisation	O
Production	P
Subvention	S

Bien que, dans les deux cas, le rôle des gestionnaires de la ressource en eau soit le même dans ses grandes lignes, cette distinction peut affecter significativement la qualité des services et l'efficacité générale de l'agriculture irriguée. En effet, dans la mesure où les gestionnaires publics n'ont de compte à rendre qu'à l'Etat, la remontée d'information et la prise en compte des recommandations des exploitants bénéficiaires par les fournisseurs de services peuvent souffrir de biais importants.

Dans le cadre des politiques de désengagement des Etats il peut advenir que tout ou partie des tâches de gestion des périmètres irrigués soit transféré aux bénéficiaires. Ce changement de statut des périmètres irrigués se réalise au cours d'une phase de transition souvent délicate. En effet, le plus souvent, les exploitants ne disposent ni des compétences, ni du temps, ni de l'organisation nécessaire à la gestion des ouvrages collectifs. Une première étape du transfert des responsabilités consiste alors à créer une cohésion au sein des utilisateurs des infrastructures.

La gestion des périmètres irrigués est une organisation qui regroupe plusieurs catégories d'acteurs, plus ou moins représentées suivant la taille des périmètres. Ce sont, dans l'ordre chronologique de leur intervention, les **concepteurs et planificateurs** qui conçoivent les infrastructures de façon à garantir une offre conforme à la demande de service dans les contextes considérés et en adéquation avec les allocations réservées au secteur agricole. La phase de conception peut intégrer une phase préalable d'audit, d'évaluation et de négociation entre les exploitants entre eux, d'une part, et entre les exploitants, les représentants des autres usagers de l'eau et les pouvoirs publics (gestionnaires de la ressource en eau, mairies, ...), d'autre part.

A l'issue de la phase de conception, interviennent les **opérateurs chargés de la construction et de la réalisation** des infrastructures. Ils interviennent de façon ponctuelle pour la durée des travaux. Ce sont soit des entreprises privées de génie civil répondant à un appel d'offre, soit des départements publics de génie civil.

Pour leur phase d'exploitation, les périmètres irrigués regroupent **plusieurs organes** ayant pour mission : la maintenance et l'entretien des réseaux et des stations de pompes, le comptage et la facturation de l'eau aux agriculteurs, et la répartition de l'eau entre les exploitants en fonction de la demande. Dans certains cas, les organismes de gestion des périmètres irrigués disposent également de cellules de formation et d'aide stratégique aux agriculteurs sur des aspects non strictement liés à l'irrigation. Dans le cas des périmètres conçus pour une répartition de l'eau entre les exploitants par tours d'eau (par opposition aux réseaux où la distribution se fait à la demande), un acteur spécifique est nécessaire pour assurer la distribution aux exploitations : **l'aiguadier**. Cet acteur intervient à l'interface entre les exploitants, et les autres acteurs de la gestion du périmètre irrigué. Son rôle ne se limite pas à la répartition de l'eau, il a également en charge le comptage des volumes d'eau, la collecte et la transmission des informations sur le fonctionnement des infrastructures et des requêtes des exploitants.

Dans la lignée des acteurs qui interviennent sur la mobilisation de l'eau on trouve ensuite les **organismes de gestion des ressources**. En France, ces organismes sont structurés en agences de bassin faisant autorité à l'échelle des bassins versants. Leur rôle consiste à garantir la durabilité de l'exploitation des ressources en eau tant du point de vue quantitatif que du point de vue qualitatif. Dans ce sens, leur mission comporte un volet important de mesure, d'évaluation et d'élaboration des connaissances nécessaires pour anticiper l'évolution du couple disponibilité/prélèvement et du couple activité/qualité.

Encadré 1-2 - Quelques observations de terrain (photographies fin juin 2004)

Au Maroc le carburant pour l'agriculture n'est ni subventionné ni détaxé (5,8 dh/l soit 0,58 €/l)



Dans le Gharb, le travail avec les animaux est encore courant



Irrigation de l'arachide sur terrain sableux, débit 20 m³/h, une personne mobilisée pendant 8 à 10 heures pour un hectare et pour une dose de 20 mm



1.2 Nécessité, apports et présentation des études de terrain

1.2.1 Intérêt et nécessité de l'analyse de cas concrets

L'agriculture irriguée soulève a priori des questions techniques, des questions de gestion des ressources et des questions économiques dont le poids et la pertinence relative ne sont pas nécessairement établis. Les enjeux qu'impliquent ces questions et leur degré de pertinence ne peuvent être déterminés que dans le cadre d'une mise en perspective avec des jeux de contraintes réels. Les études de cas réels permettent **un accès à des jeux de contraintes possibles et relativement stables**.

On distingue, par la suite, les études de terrain réalisées et les cas examinés. Les **études de terrain** s'appuient d'une part sur des enquêtes réalisées sur le terrain et d'autre part sur des données bibliographiques et des monographies utilisées pour renseigner des aspects généraux non traités par les enquêtes. Les **cas examinés** utilisent des monographies et des données compilées par d'autres. Ils apportent des éclairages partiels sur des questions spécifiques.

Un autre apport important des études de terrains est **l'interaction directe avec les acteurs**. Le dialogue permet d'évaluer pour les différents acteurs rencontrés la sensibilité et le niveau de perception des enjeux et des questionnements. A ce titre, la perception de l'eau par les acteurs est particulièrement diversifiée. Selon que ce sont des agriculteurs, des gestionnaires, des économistes, ou des chercheurs qui s'intéressent à son statut, l'eau peut être qualifiée de « don de Dieu », de « bien collectif », de « bien économique », de « droit universel » (Feuillette, 2001). De plus, sans qu'il s'agisse d'une approche proprement participative, la pratique d'enquêtes permet une première appréciation des attentes et des objectifs des acteurs.

Concernant les systèmes techniques, ils sont conçus le plus souvent pour être utilisés dans des conditions spécifiques. Suivant l'évolution des jeux de contraintes et les compétences des exploitants, les conditions d'utilisation nominales des systèmes sont plus ou moins bien respectées.

Dans de nombreux cas, l'évolution des systèmes entraîne **des évolutions des performances** qui sont difficilement prévisibles par des modèles purement techniques. L'approche de terrain permet d'identifier les principaux biais dans l'utilisation des systèmes et d'évaluer leur influence sur les performances des systèmes. Cela explique pourquoi, même dans le cas des réalisations techniques, nous privilégions les données issues d'exploitations réelles à celle issues de stations expérimentales.

Enfin la pratique d'études de terrain permet de développer une **sensibilité au monde rural**. Cette sensibilité peut concerner l'intégration des ordres de grandeur pour des quantités observées en agriculture (les surfaces, les débits, les puissances, les pressions, les rendements, les volumes, ...), mais également certaines relations pratiques entre des causes et des conséquences.

Le travail proposé repose sur l'examen de trois cas et sur deux études de terrain. Cet ensemble de situations permet de présenter des contextes réels et les jeux de contraintes associés. Les cas examinés utilisent des observations et des connaissances acquises au cours de missions effectuées entre 2000 et 2002.

Lot-et-Garonne

Population (1999) : 305 000 hab

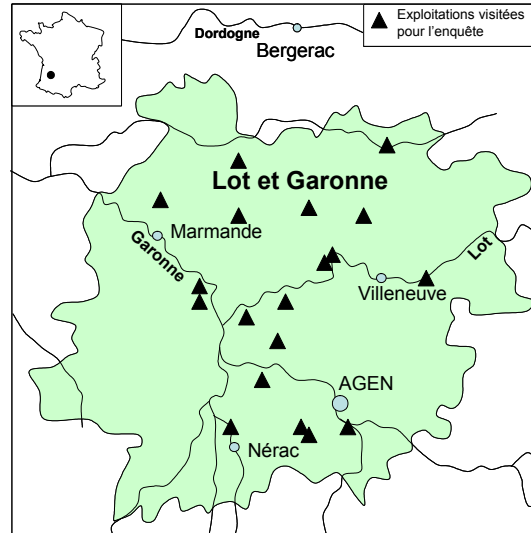
Emplois agricoles (2000) : 15 758 UTA
(Unité de Travail Annuel)

Surface agricole utile : 300 700 ha

Surface irrigable : 115 000 ha

Cultures pratiquées : maïs (61 500 ha), blé (45 700 ha), tournesol (31 500 ha), cultures fourragères (36 425 ha), légumes frais (8746 ha), légumes secs (3760 ha), tabac, pommes de terre, semences (4882 ha), cultures fruitières (14 832 ha), vignes (8662 ha), jachère (28 000 ha)
(Agritane, 2001)

Figure 1- 9 – Répartition géographique des 19 exploitations ayant fait l'objet d'un enquête irrigation – énergie



Problématiques de la zone : viabilité économique des exploitations, optimisation technique, stratégies d'exploitation (choix des cultures)

DESCRIPTION DE L'ETUDE DE TERRAIN

Date de réalisation : 23 juillet – 8 août 2003

Déplacements : 2000 km sur 10 jours

Durée de l'enquête : 2h + 1h30 de déplacement par exploitation

Travail d'enquête : visite de 19 exploitations agricoles irriguées

Données collectées au cours de l'enquête :

- description détaillée des installations (caractéristiques techniques, investissements),
- description des pratiques (cultures, doses et fréquences des apports),
- calcul des coûts de fonctionnement associés à l'irrigation,
-

Surface totale des exploitations visitées : 638 ha

Surface moyenne des exploitations visitées : 33 ha

Réalisation pratique :

Préparation de l'enquête avec la Chambre Agriculture (3 réunions), participation à une tournée hebdomadaire de la Chambre d'Agriculture consistant en relevés de sol pour établir les bulletins d'information et d'aide au pilotage, information des exploitants (par courrier de la Chambre d'Agriculture), prise de rendez-vous téléphoniques, confirmations téléphoniques, déplacements, réalisations des enquêtes.

La restitution des résultats a consisté en :

- une fiche personnalisée adressée à chaque exploitant participant à l'enquête,
- une note de synthèse mise à disposition de la Chambre d'Agriculture,
- un séminaire de présentation des résultats à Agen.

1.2.2 Deux études de terrain réalisées ...

« Lot-et-Garonne »

L'agriculture emploie 12 % de la population active du département. Cependant le nombre d'emplois dans le secteur diminue sensiblement chaque année (1988 : 24 605 UTA, 2003 : 14 734 UTA). La surface agricole utile du département est de 300 700 ha dont plus du tiers est irrigué. La première culture irriguée en Lot-et-Garonne est le maïs avec 61 500 ha pour une consommation moyenne d'eau d'irrigation que l'on peut estimer de 1500 à 2000 m³.ha⁻¹.an⁻¹ suivant les années et le type de sol (Solagro, 2003). Par ailleurs, l'agriculture en Lot-et-Garonne est très diversifiée et les cultures non céréalières occupent une place significative (plus de 30 000 ha).

L'irrigation mobilise principalement trois ressources en eau : les rivières réalimentées, les lacs collinaires, et les nappes phréatiques peu profondes. Les ressources sont mobilisées par des ouvrages privés individuels ou privés collectifs.

En Lot-et-Garonne, la diffusion de bulletins hebdomadaires faisant état du bilan hydrique pour les principaux types de sols rencontrés sur le département permet aux exploitants d'orienter le pilotage des apports en eau en termes de calendrier et de doses. Ces conseils fournis aux irrigants et le niveau élevé de sensibilisation aux problèmes de gestion de la ressource en eau, se traduisent par une bonne valorisation des volumes d'eau mobilisés.

Du point de vue des exploitations agricoles, le problème de l'irrigation se pose en termes d'optimisation technico-économique. Dans le cas des grandes cultures, les marges nettes sont réduites et peuvent dans certains cas être négatives (primes PAC comprises). En Aquitaine, la part de l'irrigation dans les coûts de production est en moyenne de 20 % (Jacquin et al., 2004). Il existe cependant des marges de manœuvre d'optimisation technique qui permettraient de minimiser les coûts notamment énergétiques de la pratique. En effet, l'énergie représente souvent plus de 30% du coût de l'irrigation. Plusieurs facteurs techniques peuvent être pris en compte pour réduire la facture énergétique de l'irrigation, ce sont notamment l'utilisation de systèmes d'irrigation basse pression, l'optimisation du dimensionnement des pompes et des réseaux et le choix de contrats de fourniture d'énergie adaptés aux besoins des exploitations.

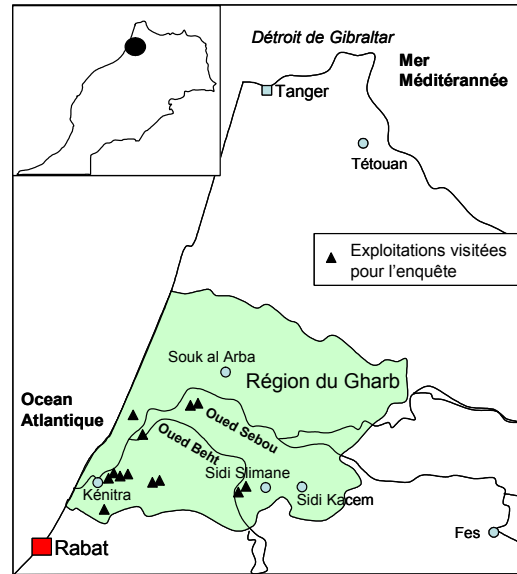
Gharb au Maroc

Population (2004) : 1 859 500 hab
Emplois agricoles (2002) : ~ 250 000

Surface agricole utile : 616 000 ha
Surface irrigable/aménagée : 222 500 / 106 000 ha

Cultures pratiquées (2001 - 2002):
blé (280 000 ha – agriculture pluviale), autres céréales (46 000 ha), légumineuses (45 400 ha), cultures fourragères (14 900 ha), canne à sucre (10 000ha), betteraves sucrières (17 400 ha), cultures oléagineuses (47 200 ha), plantations fruitières (47 400 ha), jachères (29 800 ha), cultures maraîchères (~25 000 ha)
(HCP, 2002)

Figure 1- 10 – Répartition géographique des 13 exploitations agricoles ayant fait l'objet d'une enquête irrigation-énergie



Problématiques de la zone : gestion des infrastructures, valorisation des ressources en eau, adaptation des structures et des contraintes techniques aux objectifs de développement, coût énergétique

DESCRIPTION DE L'ETUDE DE TERRAIN

Date de réalisation : 25 juin – 9 juillet 2004

Déplacements : 1500 km sur 8 jours

Durée de l'enquête : 2h à 3 h + 2h de déplacement par exploitation

Travail de terrain : visite de 13 exploitations agricoles irriguées

Données collectées au cours de l'enquête :

- description détaillée des installations (caractéristiques techniques, investissements),
- réalisation de mesures : débits des systèmes, consommations de carburant de pompes,
- description des modalités d'accès à la ressource en eau (puits, réseaux collectifs,
- description des pratiques (répartition des apports dans le temps),
- calcul des coûts de fonctionnement associés à l'irrigation.

Réalisation pratique :

Préparation et réalisation de l'enquête en partenariat avec l'INRA de Kénitra, prise de rendez-vous téléphoniques, déplacements, enquêtes, réalisation des mesures.

Prise en compte des aspects connexes : Rencontre avec des responsables d'association d'irrigants, des ingénieurs et des techniciens de la gestion des périmètres, des commerçants de matériels de pompage et d'irrigation.

« Région du Gharb »

Depuis 1960, l'Etat marocain a engagé d'importantes dépenses pour la valorisation des ressources en eau de surface dans le secteur de l'agriculture irriguée. Afin d'obtenir les financements nécessaires aux phases actuelles de réhabilitation des installations les plus anciennes, l'Etat doit fournir de nouvelles garanties aux bailleurs de fonds. Il doit notamment s'assurer du recouvrement des coûts de distribution de l'eau et gérer de manière progressive son désengagement dans la gestion et l'entretien des infrastructures (Akesbi, 1997, 2004). Dans ce contexte le secteur doit tendre vers une valorisation de la ressource qui permette d'intégrer les coûts de fonctionnement et d'entretien des infrastructures d'irrigation dans le budget des exploitations (Belghiti, 2004).

La région du Gharb est située dans la partie aval du bassin versant de l'oued Sebou. Les barrages aménagés dans ce bassin versant totalisent une capacité de stockage d'environ 6 Gm³. Le système de canaux permet de distribuer l'eau d'irrigation sur plus de 106 000 ha répartis entre irrigation gravitaire (82%) et irrigation par aspersion (18%). Ces deux types d'aménagements s'accompagnent de contraintes spécifiques qui amoindrissent le potentiel de valorisation des volumes d'eau disponibles.

Pour le gravitaire, ce sont les tours d'eau, la nécessité de prévoir les dates et les volumes des apports à l'avance et les contraintes sur les assolements qui sont pénalisants. Dans le cas de l'irrigation par aspersion, le système est conçu pour être utilisé à la demande par les exploitants. Cependant, le manque de souplesse de la technique, son efficacité médiocre et les coûts énergétiques décuplés par rapport aux systèmes gravitaires montrent les limites de ces techniques utilisées en gestion collective.

Le bassin versant du Sebou dispose également de six nappes d'eau peu profondes (5 à 20 m volume mobilisable ~ 400 Mm³). Ces nappes sont mobilisées directement au niveau des exploitations dans le cadre d'initiatives privées. La souplesse d'utilisation de ce type de ressource permet aux exploitants d'élargir leur choix techniques et stratégiques. Dans ce cas, ce sont le suivi des prélèvements et la gestion de la ressource qui posent problèmes.

1.2.3 ... et trois cas concrets examinés

En complément aux études de terrain on se propose d'examiner des aspects particuliers portant sur des cas réels que nous avons abordés dans des travaux antérieurs à la thèse (Goossens, 2000 et Goossens et Bonnet 2001 et 2003a et 2003b). Les cas examinés concernent l'évaluation de la demande en énergie de système d'irrigation dans des conditions très contraintes et de systèmes d'approvisionnement en eau de ville. Ces différents cas seront utilisés dans le document pour illustrer tel ou tel aspect par des observations et des résultats obtenus. En outre, pour certains développements, nécessaires à l'échelle nationale, les pays où ont été réalisées ces études de cas seront choisis comme exemple.

« District de Jaipur »

Dans ce cas, c'est l'échéance proche d'une crise d'approvisionnement en eau de la zone urbaine qui a attiré notre attention. Dans le district de Jaipur, les usages domestiques et agricoles de l'eau, tous deux prioritaires, sont en concurrence. Cette observation nous a conduit à une réflexion sur la zone d'étude à prendre en compte.

Encadré 1-3 - Description de l'objet des études antérieures pour les trois cas examinés

Jaïpur : Etude comparative de projets d'approvisionnement en eau

Les ressources en eau souterraines de la ville de Jaïpur (2,5 Mhab en 2000), apparaissent, depuis une dizaine d'années, insuffisantes pour satisfaire la demande croissante due à l'accroissement démographique rapide de la zone urbaine. Depuis 1996, des bureaux d'études (SAFEGE, ANTEA), étudient différents projets d'approvisionnement par des ressources alternatives. Le projet qui a fait l'objet des études les plus approfondies, consiste à mobiliser la ressource en eau d'un barrage situé à plus de 100 km de la ville avec un dénivelé de 300 m.

Nous avons été amenés à nous intéresser à ce cas dans le cadre de l'élaboration d'un outil d'évaluation du coût énergétique des projets d'approvisionnement en eau. Un travail bibliographique et une mission de trois semaines (juillet 2002) ont permis de collecter les données nécessaires à l'évaluation des coûts énergétiques de l'approvisionnement en eau actuel et à l'élaboration de différents scénarios. Ce travail a largement bénéficié des études réalisées par SAFEGE (SAFEGE, 2000) et du soutien d'ANTEA sur le terrain.

L'application de l'outil nous a notamment permis de mettre en évidence que les coûts de fonctionnement, principalement énergétiques, occasionnés par le projet de transfert d'eau depuis le barrage de Bissalpur, ne pourraient être supportés par la population. Ce constat nous a conduits à étudier des solutions apparemment moins coûteuses consistant à mobiliser les ressources en eau de la zone périurbaine dans un rayon de 25 à 50 km. Ces alternatives débouchent directement sur une problématique de **concurrence d'usage avec l'irrigation**. Afin d'intégrer cet aspect, différents scénarios de prélèvement des ressources pour la ville et d'amélioration conjointe des performances de l'irrigation ont été étudiés. L'intégration de projets d'amélioration des performances d'utilisation de l'eau pour l'irrigation permettrait de maintenir les progrès nécessaires dans la production alimentaire tout en garantissant, pour la ville, l'accès à une ressource en eau à un coût énergétique plus acceptable.

Egypte : ressources complémentaires pour faire face à une forte croissance démographique

La vallée du Nil en Egypte

La ressource en eau que constitue le Nil ($55 \text{ Gm}^3 / \text{an}$) apparaît aujourd'hui insuffisante pour satisfaire la demande alimentaire de la population égyptienne en forte augmentation. Pour faire face à ce problème, l'Egypte mobilise largement le marché international pour ses importations. On estime que les 6 Mt/an de blé importé sont équivalents à 6 à 10 Gm^3 qu'il faudrait mobiliser pour les produire localement.

Darb El Arbain

De grands projets d'aménagement hydro-agricoles ont été initiés récemment. Dans le cadre de ces projets d'aménagement, l'association DEMETER a contribué à l'amélioration des conditions de vie des agriculteurs pionniers dans la région de Darb El Arbain au sud de l'Egypte. Dans ce cadre, et à l'occasion de trois missions de une à trois semaines en 2000, 2001 et 2002, nous avons pu étudier les conditions techniques de réalisation de l'irrigation.

Nous avons notamment observé que la faible production agricole due aux conditions extrêmes de climat et de qualité des sols, couplée avec des coûts énergétiques particulièrement élevés ne permettent pas de considérer que l'activité, dans son fonctionnement actuel, est économiquement viable. En se basant sur des études techniques de rationalisation du projet hydro-agricole, l'association DEMETER a proposé un projet d'amélioration des performances eau-énergie du projet. La viabilité technico-économique n'étant vraisemblablement pas un objectif prioritaire pour la zone, le projet n'a pu aboutir.

Dans les études antérieures, le fait de considérer l'évolution de la demande en eau de l'irrigation dans la zone périurbaine comme une donnée fixe, avait conduit à exclure d'utiliser une partie de la ressource de la zone rurale pour l'approvisionnement en eau de la ville. Cependant, la pratique de l'irrigation dans la zone peut être optimisée de façon à améliorer la production agricole tout en stabilisant la demande en eau de l'irrigation. La réalisation de scénarios d'évolution de la mobilisation des ressources dans la zone rurale et dans la zone urbaine, nous a permis de mettre en évidence qu'une telle démarche permettrait à la fois de satisfaire les besoins de l'agriculture irriguée et les besoins en eau de la ville.

Cette réflexion s'inscrit par ailleurs dans la problématique, très sensible en Inde, de la consommation d'énergie pour l'irrigation et de sa prise en charge partielle par l'Etat (Devadas, 2001 a,b et c). On remarque qu'en Inde 25 à 30 % de l'électricité produite est dédiée à l'irrigation (Goossens et Bonnet, 2001).

« Vallée du Nil en Egypte »

Depuis la mise en service du barrage d'Assouan, l'Egypte dispose d'une ressource en eau dont elle peut maîtriser les débits dans le temps en fonction de prévision de la demande. A l'exception de quelques oasis situées dans les régions désertiques à l'Ouest et dans le Sinaï, le Nil constitue la ressource en eau quasi exclusive du pays (Despres, 2003). Les réseaux de canaux garantissent la répartition gravitaire de l'eau entre les zones cultivées avec un minimum de points de relevage. La consommation d'énergie pour l'irrigation est faible et se limite principalement au prélèvement de l'eau dans les canaux pour la distribution sur les exploitations. Cette opération qui nécessite des hauteurs manométriques faibles (inférieures à 5 m) est réalisée par des pompes diesel, aujourd'hui très répandues, qui ont progressivement remplacé les manèges à motricité animale (Pintus, 1997).

Aujourd'hui l'allocation en eau pour le pays est complètement mobilisée principalement pour l'irrigation, et, bien que les rendements agricoles obtenus dans la vallée du Nil soient bons, la production agricole reste insuffisante pour nourrir l'ensemble de la population du pays en forte augmentation. L'Egypte a fortement recours à l'importation de produits agricoles pour satisfaire sa demande alimentaire. Dans ce contexte, la notion d'« eau virtuelle » prend tout son sens. Par ailleurs, nous évaluerons le coût en énergie des importations en fonction des provenances.

« Darb el Arbaïn »

La région de Darb el Arbaïn est située au sud de l'Egypte à une centaine de kilomètres de la frontière soudanaise. Il s'agit d'une zone pionnière de colonisation agricole du désert. Cette zone mobilise la ressource en eau souterraine constituée par le système aquifère Nubien qui constitue une ressource alternative par rapport au Nil qui s'étend sur quatre pays (Tchad, Soudan, Libye et Egypte).

Dans ce cas le prélèvement dans la nappe dont le niveau s'établit à 60 m et les caractéristiques de conception technique de l'aménagement de base conduisent à un coût énergétique qui ne peut être supporté par les exploitants compte tenu des résultats agricoles obtenus. Le gouvernement égyptien assure l'approvisionnement en énergie et le fonctionnement des groupes de pompage. L'étude des performances énergétiques des systèmes a permis de mettre en évidence des améliorations techniques à mettre en œuvre pour réduire les coûts de l'irrigation.

Tableau 1-1 – Récapitulatif des questions soulevées (□) et traitées (■) dans les études de terrain et les cas examinés

		Etudes de terrain			Cas examinés	
		Région du Gharb	Lot et Garonne	Vallée du Nil	Darb El Arbaïn	District de Jaïpur
Objectifs	Mots clés					
	[1] Approvisionnement alimentaire	□	□			■
	[2] Durabilité - ressource en eau	■	■	■	■	■
	[3] Efficacité technico-économique	■	■	■	■	■
Questions	Echelle de l'exploitation					
Q E1	Infrastructures - efficacité	■	■		■	■
Q E2	Pilotage - efficacité	■	■	□	□	
Q E3	Infrastructures - choix culturels	■	■			
Q E4	Cibles techniques - efficacité	■	■		■	
Q E5	Coût - irrigation - agriculture	■	■	■	■	
Q E6	Investissement - fonctionnement	■	■		□	■
Q E7	Main d'œuvre - mécanisation - énergie	■	■		■	□
Q E8	Contraintes - ressources - efficacité	■	■	■	■	■
Q E9	Contraintes - réseaux - pilotage	■	■		□	
Q E10	Stockage - exploitation	□	■		■	
Q E11	Disponibilité - ressource - choix culturels	■	■		■	
	Echelles territoriales					
Q T1	Lecture énergétique - choix	■	□		■	■
Q T2	Privé - ressource en eau - gestion	■	■			■
Q T3	Concurrence d'usage		■			■
Q T4	Electricité - irrigation privée		■			■
Q T5	Energie - coût - frein de l'irrigation		■		□	■
Q T6	Energies renouvelables - viabilité - irrigation			□	■	
Q T7	Fabrication locale - matériel irrigation	□				□
Q T8	Diffusion - pratiques efficaces	■	■			
Q T9	Aide - pilotage	■	■	□	■	□
Q T10	Aide - stratégie d'exploitation	■	■		■	
Q T11	Scolarité - agriculture	□		□	□	□
Q T12	Subvention - objectifs	■	■	■	■	■
	Echelle internationale					
Q I1	Stratégies complémentaires - production	■	■			
Q I2	Financement - irrigation	■		■	■	■

Cependant, il s'est avéré que dans cette zone des objectifs tels que la rentabilité économique de l'activité agricole, la maîtrise des consommations d'eau ou l'autonomie financière des exploitants constituent des objectifs secondaires devant l'implantation de populations et l'occupation de la zone. Les difficultés rencontrées par DEMETER et l'ADEME pour définir des objectifs communs avec les autorités égyptiennes, ont conduits après plusieurs réécritures du projet à l'abandonner complètement.

1.3 Objectifs et méthodologie

1.3.1 Objectifs généraux

Il est utile de développer ici quelques aspects méthodologiques courants en agronomie ou en génie rural mais peu communs en science pour l'ingénieur.

Notre objectif est de développer un panel d'outils qui déterminent les actions à mettre en œuvre pour satisfaire les besoins prioritaires de l'agriculture irriguée dans des contextes variés.

Nous l'avons vu, l'étude et l'optimisation de l'agriculture irriguée se déclinent au travers de plusieurs objectifs de développement qui soulèvent eux-mêmes de nombreuses questions sous-jacentes. De plus, ces approches impliquent souvent plusieurs échelles et un jeu d'acteurs conséquent. Nous pouvons ainsi considérer que l'étude et l'optimisation de l'agriculture irriguée répondent aux caractéristiques d'un problème complexe. Afin d'utiliser les bases méthodologiques les mieux adaptées au problème, il paraît utile de définir les attentes que l'on a vis-à-vis du cadre méthodologique que l'on met en œuvre dans le travail proposé. Ces attentes sont multiples.

Premièrement, la méthodologie utilisée doit apporter un cadre aux points suivants :

- la délimitation du ou des systèmes étudiés,
- le choix des moyens d'investigation et d'accès à l'information,
- la construction d'une représentation cohérente et intelligible du système étudié,
- l'élaboration des outils d'amélioration des systèmes.

Enfin, la méthodologie doit définir les limites du problème étudié tout en autorisant l'intégration occasionnelle d'aspects qui présenteraient pour certaines circonstances un niveau de couplage significatif avec les objectifs de développement des systèmes étudiés.

1.3.2 Les objets étudiés

Le système d'irrigation constitue le principal objet d'étude. L'analyse de cet objet doit mettre en évidence des cibles opérationnelles pour l'amélioration des performances. Cependant, suivant l'échelle opérationnelle d'observation des systèmes, et suivant le point de vue au sens disciplinaire (agronomique, technique, gestion des ressources, économique, ...) adopté pour analyser les systèmes d'irrigation, la notion de performance ne présente pas la même signification et pourra être formalisée par des relations différentes intégrant des flux différents. Se pose alors la question de la hiérarchisation des critères de performance.

Parmi les deux approches envisagées, **la première consiste à spécialiser l'étude** en choisissant de manière arbitraire ou argumentée les critères de performance liés à l'amélioration de la productivité des surfaces cultivées, de l'eau, du temps de travail, de l'énergie, du capital investi, ...

Tableau 1-2 – Synthèse des principaux termes de complexité

Trois objectifs

Satisfaire la demande alimentaire
Assurer la disponibilité des ressources naturelles dans le temps
Tendre vers la rationalité économique

Trois disciplines

Nutrition (besoins des hommes)
Agronomie (besoins en eau des cultures)
Physique (bilans hydriques, mécanique des fluides, énergétique)

Trois flux physiques

Production agricole
Eau pour la production agricole
Energie pour la mobilisation et la répartition de l'eau

Trois échelles d'observation et d'action

Nationale (politiques agricole, de l'eau et énergétique)
Territoriale (applications locales)
Exploitation (réalisations effectives)

Cette approche sous-entend que l'on est capable de proposer un classement a priori des critères de performance. Nous pensons que l'élaboration d'un tel classement peut conduire à un certain nombre de tensions, d'incompréhensions ou de cloisonnements entre les disciplines, chacune d'elles défendant la prévalence du flux qu'elle traite.

Il en résulte que l'approche économique considérée comme plus intégratrice est souvent privilégiée par rapport à l'étude des flux physiques. Les flux physiques (production agricole, eau, énergie) sont alors considérés comme des facteurs de production ou des facteurs de croissance (Ayres, 2001 et 2002).

Cependant, la place de choix ainsi accordée à la lecture économique, peut conduire à perdre de vue ou à **affaiblir la perception concernant certaines contraintes fondamentales** comme les besoins vitaux des populations et les limites de disponibilité des ressources naturelles. Appliquée à l'objet « irrigation » qui mobilise des flux d'eau, d'énergie, du temps de travail et qui contribue à la production agricole directement liée à l'alimentation des populations, une telle lecture ne nous semble pas satisfaisante.

“The question then arises: without ever-cheaper natural resources to exploit can economic growth continue indefinitely? The answer may be yes, but there is a condition: provided that an alternative growth mechanism is available. Resource productivity and labor productivity must increase simultaneously, but not by increasing labor productivity by consuming ever more natural resources.” (Ayres, 2001)

Une deuxième approche consiste à rechercher **l'intégration de l'objet d'étude dans un système plus global et plus complexe** en espérant que la complexification permettra d'établir le classement recherché entre les critères de performance sur une base plus objective du point de vue disciplinaire. Les systèmes d'irrigation sont reliés à trois systèmes de production et de mobilisation de flux physiques que sont :

- **la production agricole,**
- la mobilisation des ressources en eau,
- les systèmes de mobilisation des ressources énergétiques.

Il convient de noter que la fonction de l'irrigation (amélioration des rendements agricoles) n'a de sens que dans les systèmes de production agricole. En d'autres termes, l'irrigation fait partie du projet de production agricole, alors qu'elle ne fait qu'utiliser les systèmes de mobilisation des ressources en eau et en énergie. Par conséquent, il nous semble plus judicieux d'intégrer les systèmes d'irrigation au système de production agricole qui est lui-même intégré dans le système d'approvisionnement alimentaire.

Cette sélection de trois objets d'études que constituent **les systèmes (i) d'approvisionnement alimentaire, (ii) de production agricole et (iii) d'irrigation**, permet de relier l'irrigation aux besoins alimentaires des populations tout en soulignant l'existence d'un flux physique central dans la problématique : **la nourriture**.

Nous proposons de définir la performance de ces trois objets (systèmes d'approvisionnement alimentaire, de production agricole, et d'irrigation) comme leur aptitude à satisfaire les besoins alimentaires des populations dans le respect des principes d'équité, de durabilité et de rationalité économique.

Figure 1- 11 – Organisation des contraintes, fonctions et objectifs de l’agriculture irriguée

OBJECTIFS :

SATISFACTION (1)

DURABLE (2)

et ECONOMIQUE (3)

des CONTRAINTES

par la réalisation et l'optimisation

des FONCTIONS

Contraintes primaires

Contraintes pour la réalisation des fonctions

Contraintes pour la réalisation des sous fonctions

Fonctions

Sous fonctions

BESOINS alimentaires

Besoins en énergie pour la répartition

RESSOURCES Extérieures

Besoins en argent pour l'achat

Besoins en énergie pour l'importation

BESOINS en alimentation animale hors importation

Besoins en produits végétaux des animaux

Besoins en eau des animaux

Besoins en énergie pour la répartition

BESOINS en production végétale hors importation

BESOINS en aliments d'origine végétale

BESOINS en rayonnement, CO₂, eau, nutriments

RESSOURCES en sol

CLIMAT / ATMOSPHERE

Besoins en argent/énergie (engrais)

BESOINS complémentaires en eau

Besoins en énergie pour répartir l'eau

Besoins en infrastructures

Besoins en main d'oeuvre

Besoins en argent (En. Infr. M.O.)

RESSOURCES en eau

Besoins en énergie

Besoins en infrastructures

Besoins en main d'oeuvre

Besoins en argent (En. Infr. M.O.)

REPARTIR

IMPORTER / EXPORTER

PRODUIRE des aliments d'origine animale

REPARTIR prod. vég. (hommes / animaux)

PRODUIRE des végétaux

CULTIVER

CHOISIR culture et date de plantation

FERTILISER

IRRIGUER

REPARTIR eau (temps et espace)

MOBILISER les ressources en eau

1.3.3 Les éléments de méthode retenus pour l'analyse des systèmes

L'analyse envisagée repose sur **l'évaluation des flux physiques (alimentation, eau, énergie)** et des relations entre ces flux. Dans cette évaluation qui se veut quantitative, l'organisation des techniques et des pratiques est tout aussi déterminante que les contraintes physiques imposées par la nature (climat, ressources en eau et en énergie, mécanisme de croissance des plantes, ...). A ce titre on peut qualifier les objets d'étude de sociotechniques. Bien que ces objets, on dira plutôt systèmes, présentent une organisation caractérisée par son autonomie, ses savoir-faire, sa capacité à proposer, à décider et à s'adapter, ils ne sont pas pleinement efficaces. En effet, si l'on admet que l'action des systèmes d'approvisionnement agricole a pour objectif la satisfaction équitable, durable et économiquement rationnelle des besoins alimentaires des populations, de nombreux indicateurs montrent que **d'une part l'équité et d'autre part la durabilité sont loin d'être acquis** (FAO, 1996, 2003b).

En outre, il est intéressant de ne pas perdre de vue que le sujet traité doit permettre **d'intégrer des connaissances issues de plusieurs disciplines** que nous n'avons pas la prétention de maîtriser mais dont il est nécessaire d'utiliser les résultats généraux qui nous paraissent utiles. Les connaissances dont nous aurons besoin sont notamment tirées des domaines de la nutrition, de l'agronomie, de l'énergétique et des techniques de l'ingénieur.

L'approche retenue vise à l'évaluation et au renforcement de la cohérence entre les actions techniques mises en œuvre et les jeux de contraintes (besoins et ressources) qui existent aux différentes échelles et pour les différents contextes. Pour ce faire, nous basons la description du système et des sous-systèmes étudiés sur le principe de la conjonction systémique explicité par Le Moigne (1999). Cette conjonction met en relation les quatre concepts considérés comme fondateurs que sont : (i) l'environnement actif, (ii) les fonctions, (iii) le projet téléologique (les objectifs) et (iv) les transformations.

Nous proposons de définir les trois premiers concepts comme les **contraintes**, exprimées comme un jeu de besoins et de ressources, les **fonctions** et les **objectifs** de l'irrigation. A l'occasion d'une première description, hors contexte spécifique (Partie 2), les connaissances de base ainsi que les valeurs de références sont explicitées.

Par la suite, nous reprendrons le concept de **transformation par la proposition d'outils** pour orienter l'action à différentes échelles. Se basant sur l'évaluation des contextes réels en termes de potentiel des ressources d'une part, et de potentiels des hommes d'autre part, ces outils ont pour objectifs d'évaluer la pertinence ainsi que les gains qui peuvent être attendus de telle ou telle orientation nationale, démarche territoriale, ou action technique locale.

Les outils proposés s'appuient, tout du moins pour les approches à l'échelle de petits territoires et des exploitations, sur des études réalisées sur le terrain. Cette nécessité est notamment liée au fait qu'aucune action d'amélioration technique efficace ne peut être envisagée sans une connaissance fine des contextes et sans la pleine participation des acteurs. Les acteurs, par leur vécu, disposent en effet d'une lecture hiérarchisée, justifiée ou non, des différentes contraintes, lecture dont il est primordial de tenir compte.

PARTIE 2 : ANALYSE et MODELISATION

2 Contraintes et besoins de l'alimentation et de l'irrigation

2.1 Contraintes du système d'approvisionnement alimentaire

- 2.1.1 Les besoins alimentaires de l'homme
- 2.1.2 Distribution et accessibilité des productions agricoles

2.2 Contraintes de la production agricole végétale

- 2.2.1 Les besoins des cultures
- 2.2.2 Disponibilité et qualité des terres cultivables
- 2.2.3 Le climat
- 2.2.4 Les besoins en eau des cultures

2.3 Contraintes de l'irrigation

- 2.3.1 Relation entre l'ETM, l'ETc et le rendement des cultures
- 2.3.2 Disponibilité et accessibilité des ressources en eau

3 Fonctions de l'alimentation et de l'agriculture irriguée

3.1 Nourrir les hommes

- 3.1.1 Production végétale
- 3.1.2 Production animale
- 3.1.3 Importation des denrées alimentaires
- 3.1.4 Collecte, transport et distribution de la production agricole

3.2 Produire les végétaux

3.3 Mobiliser les ressources en eau et irriguer

- 3.3.1 Prélèvement
- 3.3.2 Transport et distribution
- 3.3.3 Répartition de l'eau sur les parcelles
- 3.3.4 Pompage
- 3.3.5 Pilotage de l'irrigation
- 3.3.6 Demande en énergie de quelques configurations

4 Objectifs de l'alimentation et de l'irrigation

4.1 Efficacité de l'approvisionnement alimentaire

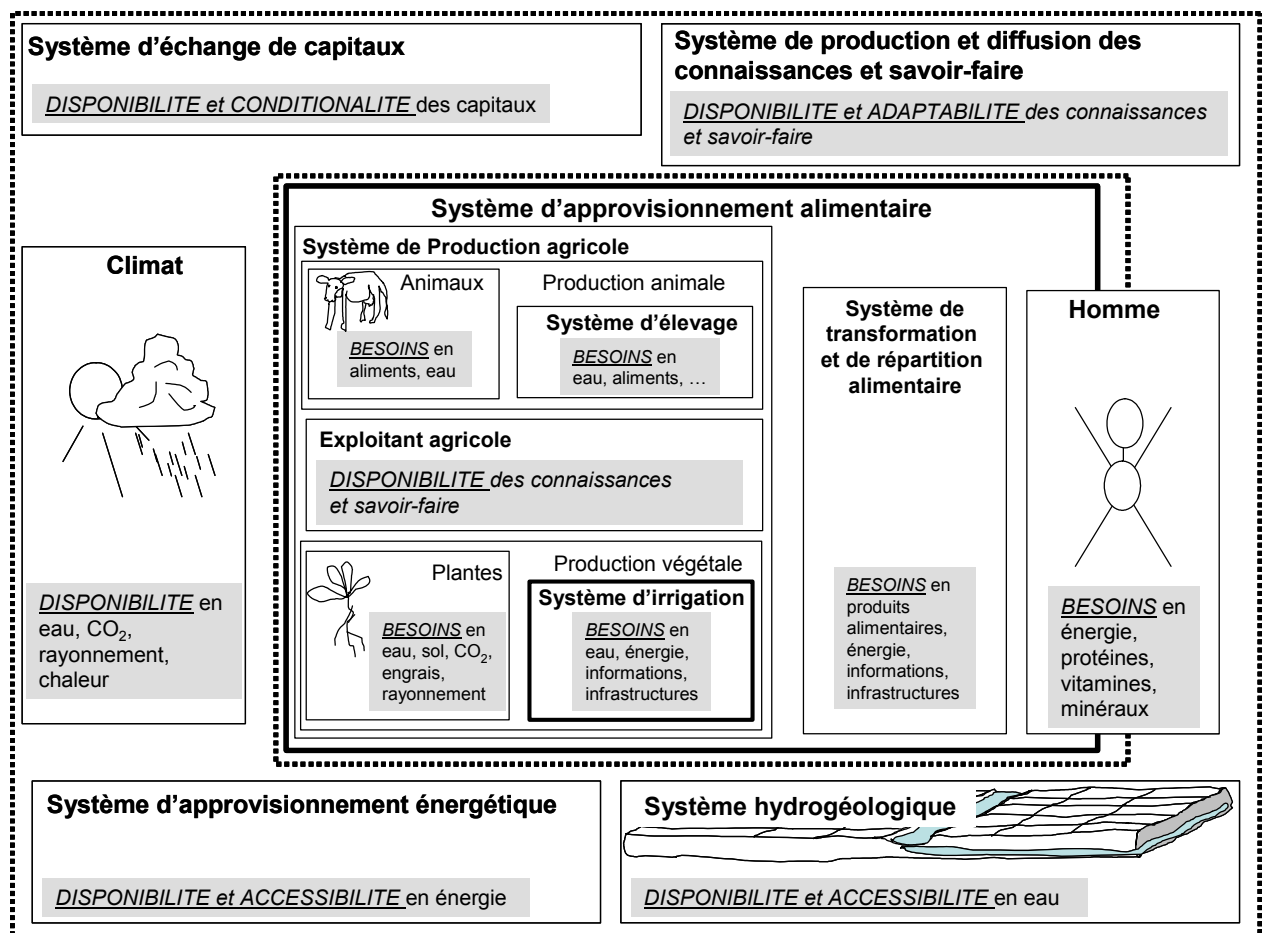
- 4.1.1 Efficacité générale
- 4.1.2 Efficacité de répartition
- 4.1.3 Efficacité de production

4.2 Durabilité physique de la mobilisation des ressources

- 4.2.1 Durabilité de la mobilisation des ressources en eau
- 4.2.2 Durabilité de la mobilisation des sols
- 4.2.3 Durabilité de la mobilisation des ressources énergétiques

4.3 Productivité de l'agriculture irriguée

Figure 2- 1– Description des contraintes externes (besoins alimentaires et disponibilités en flux externes nécessaires à la satisfaction des besoins de l’approvisionnement alimentaire) et internes (besoins en termes de flux nécessaires au fonctionnement des sous-systèmes) du système d’approvisionnement alimentaire, du système de production agricole et du système d’irrigation.



2 Contraintes et besoins de l'alimentation et de l'irrigation

Ce chapitre a pour objectif de décrire l'environnement dans lequel se situe le système d'approvisionnement alimentaire en portant une attention particulière aux sous-systèmes que constituent la production végétale et l'irrigation que l'on se propose d'étudier successivement. Pour ce faire, on propose de décrire les contraintes auxquelles sont soumis le système et les sous-systèmes. On désigne par contraintes, **les éléments susceptibles de conditionner l'évolution** des systèmes au cours du temps. Ce sont notamment des besoins, des disponibilités, des accessibilités, et des relations régissant les interactions entre l'ensemble des paramètres utiles à la description du système.

Parmi les contraintes et les besoins de l'approvisionnement alimentaire, on distingue les paramètres et les relations indépendantes des contextes et des évolutions de ceux qui sont liés aux contextes et à leurs évolutions.

La plupart des relations physiques et des facteurs physiques et biologiques peuvent être considérés comme indépendants des contextes. Ce sont, par exemple, des relations et des coefficients qui permettent d'établir les besoins alimentaires des individus, les besoins en eau d'une culture donnée, ou le coût énergétique de l'utilisation de telle ou telle technique.

Parmi les paramètres liés aux contextes, on trouve notamment, le climat, le type de sol, les facteurs économiques et politiques tels que les tarifs des fluides, le coût de la main d'œuvre, les règles d'accès aux ressources en eau, ou les niveaux techniques des acteurs. Suivant l'échelle et la durée de la période d'observation, ces facteurs peuvent représenter des contraintes ou des facteurs ajustables. Le tarif de l'énergie en est un bon exemple. A l'échelle de l'exploitation agricole, il représente une contrainte alors qu'à l'échelle nationale il est un paramètre qui peut être ajusté pour servir telle ou telle orientation politique.

Par ailleurs, l'identification de cibles opérationnelles techniques pertinentes exige un certain niveau de détail dans la description des situations. Le niveau de détail requis peut impliquer la prise en compte de certains éléments de complexité. **On sera par la suite amené à décider si l'intégration de tel ou tel élément de complexité est faisable, et si son intérêt justifie le coût d'analyse qu'elle implique.** En dehors du cœur de la problématique de ce travail, les éléments de complexité qui pourront être intégrés devront être des résultats formalisés et tenus pour acquis par les spécialistes du domaine considéré.

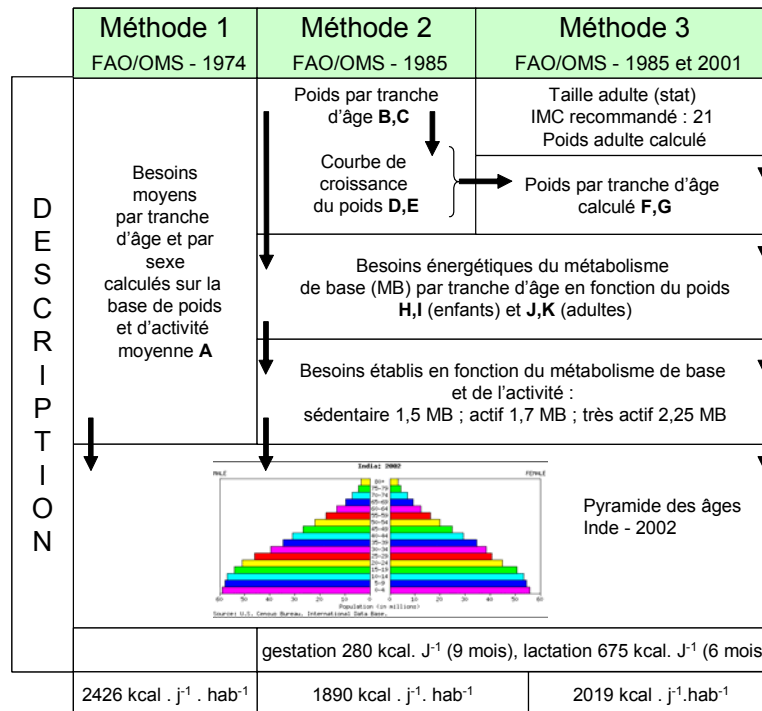
2.1 Contraintes du système d'approvisionnement alimentaire

2.1.1 Les besoins alimentaires de l'homme

Le corps humain constitue au même titre que l'ensemble des êtres vivants une mécanique relativement complexe dont le bon fonctionnement passe par la satisfaction de besoins élémentaires ainsi que par le respect de certaines caractéristiques physiques du milieu d'évolution (température, pression, rayonnement, disponibilité d'oxygène et absence d'éléments toxiques dans l'air).

L'homme est un être hétérotrophe, il a besoin pour son alimentation de matière d'origine organique élaboré par d'autres êtres vivants du règne végétal ou animal.

Encadré 2-1 - Trois méthodes d'évaluation de la demande énergétique alimentaire moyenne d'une population (application au cas de l'Inde)



Méthode 1		
A		
	Poids	Besoins
	kg	kcal . j ⁻¹
Enfants		
0-1 an	7,3	820
1-3 ans	13,4	1360
4-6 ans	20,2	1830
7-9 ans	28,1	2190
Adolescents		
10-12 ans	36,9	2600
13-15 ans	51,3	2900
16-19 ans	62,9	3070
Adolescentes		
10-12 ans	38	2350
13-15 ans	49,9	2490
16-19 ans	54,4	2310
Hommes adultes		
	65	3000
Femmes adultes		
	55	2200
Grossesse (2eme moitié)		+ 350
Lactation (premiers 6 mois)		+ 550
H		3000
F enceinte		2550
F lactation		2750
F		2200

Méthode 2		Méthode 3				Méthode 2 et 3				
B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
Poids corporel [kg]		[%] du poids adulte		[kg] calculé		kcal . Kg ⁻¹ . j ⁻¹		MB kcal j ⁻¹		
Age	H	F	H	F	H	F	H	F	H	F
0	6,6	6,1	13%	14%	7,3	6,9				
1	9,3	8,6	18%	20%	10,3	9,8	82	80		
2	10,9	10,5	21%	24%	12,0	12,0	84	81		
3	12,4	12,1	24%	28%	13,7	13,8	80	77		
4	13,9	13,4	27%	31%	15,4	15,3	77	74		
5	15,5	14,6	30%	34%	17,1	16,6	74	72		
6	17,1	15,9	33%	37%	18,9	18,1	73	69		
7	18,7	17,4	37%	41%	20,7	19,8	71	67		
8	20,2	19,2	40%	45%	22,3	21,9	69	64		
9	21,8	21,3	43%	50%	24,1	24,2	67	61		
10	23,7	23,8	46%	55%	26,2	27,1	65	58		
11	26,1	26,7	51%	62%	28,8	30,4	62	55		
12	29,3	30	57%	70%	32,4	34,2	60	52		
13	33,4	33,5	65%	78%	36,9	38,1	58	49		
14	38,4	36,8	75%	86%	42,4	41,9	56	47		
15	43,4	39,7	85%	93%	48,0	45,2	53	45		
16	47,8	41,6	94%	97%	52,8	47,4	52	44		
17	51	42,7	100%	100%	56,4	48,6	50	44		
adulte	51,1	42,9	100%	100%	56,5	48,8				
18-30	51,1	42,9			56,5	48,8			15,1 P + 692	14,8 P + 487
30-60	51,1	42,9			56,5	48,8			11,5 P + 873	8,1 P + 846
>60	51,1	42,9			56,5	48,8			11,7 P + 587	9,1 P + 658

A – Besoins énergétiques moyens d'après Passmore et. al (1974)
 B, C – Poids par tranche d'âge en Inde d'après James et Scofield (1992)
 D, E – Proportion du poids adulte par tranche d'âge établie d'après B et C
 F, G – Poids calculé d'après D et E, sur la base d'un poids adulte calculé pour obtenir un IMC (indice de masse corporelle) de 21 (FAO, 2001) avec les tailles moyennes données par James et Scofield (1992), (homme : 164 cm, femme : 152,5 cm)
 H, I - Besoins énergétiques des enfants et des adolescents par unité de poids pour une activité modérée
 J, K – Relation entre l'âge et le poids et le métabolisme de base des adultes. On considère que l'activité moyenne de la population se situe pour l'Inde entre une activité modérée et intense, d'où un coefficient multiplicateur du MB = 1,8 (FAO, 2001).

Les aliments apportent à l'homme **l'énergie** (glucides, lipides et dans certains cas protéines) nécessaire à ses activités et au maintien de ses fonctions vitales, ainsi que **les matériaux** nécessaires à la croissance, à l'entretien et au fonctionnement des cellules et des tissus de son organisme (protéines, vitamines et minéraux). Welch et Graham (2005) indiquent qu'il y a au moins 50 nutriments nécessaires à l'organisme, qui peuvent être classés en : (i) eau et énergie, (ii) protéines, (iii) lipides, (iv) macro minéraux, (v) micro minéraux, et (vi) vitamines. Cet inventaire partiel des nutriments permet de se faire une idée de la grande diversité et de la complexité des éléments nécessaires au bon fonctionnement du corps humain tout en soulignant l'intérêt d'une alimentation diversifiée et équilibrée.

L'évaluation des besoins énergétiques des individus et des populations

Le corps humain consomme de l'énergie pour maintenir ses fonctions vitales (circulation sanguine, respiration, ...), pour la digestion, la croissance, la reproduction, la synthèse du lait, et pour l'ensemble des interactions mécaniques qu'il a avec le milieu extérieur.

L'énergie nécessaire au maintien des fonctions vitales du corps humain est nommée métabolisme de base (MB). Les besoins quotidiens de l'homme moyen peuvent être estimés à 2500 kcal. j⁻¹, répartis entre le métabolisme de base (1670 kcal. j⁻¹), la chaleur de digestion (140 kcal. j⁻¹), les activités (440 kcal. j⁻¹) et les pertes (225 kcal. j⁻¹) (Bonnet, 1998, d'après James et Schofield 1992). Cette consommation représente une puissance moyenne appelée de 120 W. Ces besoins varient en fonction de l'âge, du sexe et de l'activité des individus.

Les besoins en énergie alimentaire d'une population se déterminent en additionnant les besoins énergétiques des individus. Pour ce faire, on attribue des besoins spécifiques à chaque tranche d'âge pour les hommes et les femmes de la population considérée. On ajoute les besoins complémentaires pour les femmes enceintes et les femmes en période d'allaitement. En 1974, Passmore et al. proposent une série de valeurs des besoins énergétiques applicables à chaque tranche d'âge.

En 1986, la FAO, l'OMS et l'UNU, repris en 1992 par James et Schofield, proposent d'ajuster le calcul des besoins énergétiques en introduisant une dépendance au poids corporel moyen des individus et en prenant en compte le niveau d'activité des populations considérées. Pour ce faire, ils estiment l'énergie requise pour le métabolisme de base (MB) en fonction du poids corporel, de l'âge et du sexe des individus. L'énergie requise pour le MB est ensuite multipliée par un coefficient qui rend compte du niveau d'activité moyen des individus. La valeur de ce coefficient varie de 1,5 pour un mode de vie sédentaire à 2,25 pour un mode de vie impliquant une forte activité physique. Cependant, dans les pays où une part importante de la population est sous-alimentée la masse corporelle moyenne des individus est inférieure à ce qu'elle serait si la population avait accès à une alimentation suffisante. La méthode conduit donc à sous-estimer le besoin énergétique alimentaire de la population. On peut émettre le même type de critique à cette méthode lorsque elle est appliquée au pays dans lesquels une alimentation trop riche en énergie conduit à des problèmes d'obésité pour une part significative de la population. Dans ce dernier cas, la méthode conduit à une surestimation des besoins moyens en énergie alimentaire.

Tableau 2-1 – Les 20 acides aminés présents dans l'alimentation : classement, besoins, et présence dans le blé et le pain en Inde

Classement des acides aminés (Kirste et Heimau, 1998)		Estimation des besoins par âge en mg. kg ⁻¹ . j ⁻¹ (FAO/OMS/UNU, 1986)				Présence dans le blé indien mg / 100 g (Anjum, 2005)		
		Nourissons	Enfants		Adultes	Farine Inde 1995 - 1997	Pain (chapati)	
		3 à 4 mois	2 ans	10 - 12 ans				
Acides aminés essentiels								
1	Isoleucine	ile	70	31	30	10	341	277
2	Leucine	leu	161	73	45	14	651	542
3	Lysine*	lys	103	64	60	12	32	26
4	Méthionine*	met	58 ^a	27 ^a	27 ^a	13 ^a	108	101
5	Phénylalanine	phe	125 ^b	69 ^b	27 ^b	14 ^b		
6	Threonine*	thr	87	37	35	7	367	353
7	Tryptophan	trp	17	12,5	4	3,5		
8	Valine	val	93	38	33	10	394	359
Acides aminés semi essentiels								
9	Arginine**	arg					354	285
10	Histidine**	his	28	?	?	8 à 12	186	159
Acides aminés non (ou semi) essentiels								
11	Cystéine	cys						
12	Tyrosine	tyr					326	283
Acides aminés non essentiels								
13	Asparagine	asn						
14	Aspartic acid	asp					645	618
15	Glutamine	gln						
16	Glutamic acid	glu					991	844
17	Glycine	gly					549	526
18	Proline	pro					1124	1088
19	Alanine	ala					66	63
20	Serine	ser					55	538

* Acides aminés les plus rares dans la chaîne alimentaire (Anjum, 2005)

** Essentiels en période de croissance

a besoins combinés de méthionine et de cystéine

b besoins combinés de phénylalanine et de tyrosine

Tableau 2-2 – Niveau de sécurité de l'apport protéique de la naissance à l'âge adulte (en g de protéine par kg de masse corporelle et par jour) et apports supplémentaires pour les femmes enceintes et en période de lactation (FAO/OMS/UNU, 1986)

Enfants		Adolescents		
Age (ans)		Age (ans)	Filles	Garçons
0,25 - 0,5	1,86	10 - 11	1	0,99
0,5 - 0,75	1,65	11 - 12	0,98	0,98
0,75 - 1	1,48	12 - 13	0,96	1
1 - 1,5	1,26	13 - 14	0,94	0,97
1,5 - 2	1,17	14 - 15	0,9	0,96
2 - 3	1,13	15 - 16	0,87	0,92
3 - 4	1,09	16 - 17	0,83	0,9
4 - 5	1,06	17 - 18	0,8	0,86
5 - 6	1,02	Adultes	0,75	
6 - 7	1,01			
7 - 8	1,01			
8 - 9	1,01			
9 - 10	0,99			
Besoins supplémentaires - femmes enceintes				
1er trim.	+ 1,2 g			
2e trim.	+ 8,1 g			
3e trim.	+ 10,7 g			
Besoins supplémentaires - lactation				
Lactation	+ 13 g			

Tableau 2-3 - Valeurs du taux de digestibilité des protéines chez l'homme

Source de protéines	Digestibilité réelle (moyenne)
Oeuf	97 ± 3
Lait, fromage	95 ± 3
Viande, poisson	94 ± 3
Maïs	85 ± 6
Riz	88 ± 4
Blé complet	86 ± 5
Blé raffiné	96 ± 4
Farine d'avoine	86 ± 7
Millet	79
Pois (à maturité)	88
Beurre d'arachide	95
Farine de soja	86 ± 7
Haricots	78
Maïs + haricots	78
Maïs + haricots + lait	84
Riz indien	77
Riz indien + lait	87

Dans un rapport plus récent, la FAO (2001b), conseille d'estimer les besoins du MB à partir d'une évaluation du poids corporel basé sur la taille moyenne des individus et l'indice de masse corporelle ($IMC = \text{masse corporelle [kg]} / (\text{taille [m]})^2$) moyen recommandé. La fourchette de valeur acceptable de l'IMC au niveau individuel est comprise entre 18,5 et 24,9 kg/m². Pour une population, la FAO suggère de retenir une valeur de 21 kg/m² pour l'IMC moyen. D'après l'OMS (WHO, 1995), la « sous-charge pondérale » indiquée par un IMC faible (<18 kg/m²) peut être associée à un déficit chronique d'énergie qui se traduit par une augmentation significative de la mortalité et une forte réduction du niveau d'activité.

L'Encadré 2-1 reprend les trois méthodes d'évaluation des besoins énergétiques alimentaires des populations présentés ci-dessus pour le cas de l'Inde. Ces méthodes d'estimation des besoins en énergie alimentaire ne tiennent pas compte des pertes inévitables dues au transport, au stockage et à la préparation des aliments.

Les besoins en protéines de l'homme

Dans l'alimentation, les protéines ont pour fonction première d'apporter à l'organisme les briques de base (les acides aminés) de la constitution des os, des muscles, des membranes, de la peau, ... Les protéines apportent également des matériaux bruts nécessaires à la formation des suc digestifs, des hormones, de certaines vitamines, de l'hémoglobine (Passmore, 1974), ... Les protéines sont construites à partir de **20 acides aminés** différents dont 8 sont essentiels (ne peuvent être synthétisés par l'homme), 12 sont non essentiels dont 2 sont essentiels pendant l'enfance et la grossesse. Une protéine peut être constituée de 50 à 200 acides aminés. D'après la FAO (2003), en toute rigueur, **ce sont les besoins et les apports en acides aminés qui devraient être pris en compte**. En effet, suivant la nature des aliments, la proportion des différents acides aminés dans les protéines est variable. Certains acides aminés essentiels sont absents ou disponibles en quantités insuffisantes dans certains aliments notamment d'origine végétale.

En 1986, une consultation d'experts FAO/OMS/UNU, a proposé une synthèse des travaux disponibles concernant les besoins en protéines du corps humain pour les différents âges et pour les deux sexes. Ce rapport souligne la capacité d'adaptation de l'organisme à une réduction de l'apport en protéines par un mécanisme performant de recyclage des acides aminés issus de la dégradation des protéines. Cependant, même si les acides aminés peuvent être recyclés plusieurs fois, une part d'entre eux sont perdus au cours du catabolisme oxydatif. Il en résulte que le rendement de ce mécanisme de recyclage est inférieur à l'unité et que le fonctionnement normal de l'organisme occasionne des pertes. Ces pertes en acides aminés sont variables en fonction des apports alimentaires en protéines. Le seuil inférieur de ces pertes est désigné sous le nom de pertes obligatoires. Le rapport insiste sur le fait que, contrairement aux approches recommandées par un comité d'experts en 1971, l'estimation des besoins en protéines ne peut pas s'appuyer sur l'évaluation des pertes obligatoires. Le besoin moyen est estimé à 0,58 g de protéines par kg de poids corporel et par jour. Afin de tenir compte de la variation du besoin entre les individus, un apport de sécurité de 0,75 g . kg⁻¹ . j⁻¹ est recommandé pour les adultes. Cette valeur est valable pour les hommes et pour les femmes mais doit être ajustée pour les femmes enceintes et en période d'allaitement ainsi que pour les enfants et les adolescents. En effet la valeur de 0,75 g/kg et les valeurs présentées dans le Tableau 2-2, correspondent à des besoins en protéines dites de bonne qualité (de l'œuf et du lait). Il convient par conséquent de tenir compte de la digestibilité des protéines présentes dans les différents aliments (Tableau 2-3).

Tableau 2-4 – Apports recommandés pour les principales vitamines et les principaux minéraux

		Enfant 4 à 6 ans	Adolescent 13 à 15 ans	Adolescente 13 à 15 ans	Homme adulte	Femme adulte
Poids corporel	kg	20	51	50	65	55
Energie	kcal	1830	2900	2490	3000	2200
Protéine	g	20	51	50	49	42
Vitamines						
A - rétinol	µg	450	600	600	600	500
D - cholécalciférol	µg	5	5	5	5	5
B1 - thiamine	mg	0,6	1,2	1,1	1,2	1,1
B2 - riboflavine	mg	0,6	1,3	1	1,3	1,1
B3 - niacine	mg	8	16	16	16	14
Folate	µg	200	400	400	400	400
B 12 - cyanocobalamine	µg	1,2	2,4	2,4	2,4	2,4
C - acide L-ascorbique	mg	30	40	40	45	45
Minéraux						
Sodium	g				1,5	1,5
Potassium	mmol				12	12
Calcium	mg	600	1300	1300	1000	1000
Magnesium	mg	73	250	230	260	220
Fer*	mg	6	15 -19	28	11	24
Zinc*	mg	5	10	8	7	5
Iode	µg	110	120	130	130	110

source : FAO/OMS, 2001 (sauf pour sodium, potassium : Jacotot et Leparco - 1992)

* apports recommandés pour une biodisponibilité de moyenne pour le zinc et de 10% pour le fer (l'absorption du fer est favorisée par la présence de vitamine C dans l'alimentation)

Enfin, d'après le même rapport, le rendement d'utilisation des protéines est sensible à la disponibilité d'énergie dans l'organisme. Il apparaît en effet que l'augmentation de l'apport énergétique permet d'accroître la synthèse des protéines et de réduire l'oxydation des acides aminés. En revanche, la disponibilité en protéines ne semble pas influencer l'efficacité de l'utilisation de l'énergie.

Les besoins en vitamines et en minéraux de l'homme

En plus de ses besoins en énergie et en protéines, l'organisme a besoin d'apports en minéraux et en vitamines. Nous n'avons pas la compétence pour établir ici une description exhaustive et opérationnelle des fonctions, des besoins et des sources alimentaires pour l'ensemble des vitamines et des minéraux. Nous noterons cependant que, parmi l'ensemble des micronutriments nécessaires au bon fonctionnement de l'organisme, certains font l'objet d'une attention particulière de la part des nutritionnistes et des planificateurs de l'approvisionnement alimentaire. Ce sont notamment les nutriments dont les carences observées, à grande échelle et sur des populations significatives, se traduisent par des problèmes de santé publique. Dans l'établissement des régimes alimentaires, les nutriments ciblés par ces études peuvent également servir d'indicateurs pour évaluer l'équilibre d'une ration alimentaire.

Les micronutriments les plus souvent pris en considération (WHO, 2002 ; Kennedy et al., 2003 ; OMI/UNICEF 2004 ; FAO/OMS, 2001) sont : la vitamine A, la vitamine C, les folates et l'acide folique, le fer, le zinc et l'iode. Les apports recommandés pour ces nutriments et quelques autres éléments importants sont présentés Tableau 2-4.

2.1.2 Distribution et accessibilité des productions agricoles

Distribution dans l'espace de la production et de la demande

La répartition spatiale de la production alimentaire, d'une part, et de la demande, d'autre part, constitue un aspect contraignant supplémentaire de l'approvisionnement alimentaire. Les besoins en termes de répartition peuvent s'exprimer comme le produit des masses à transporter par les distances à parcourir. Il convient de distinguer trois étapes de la répartition : la collecte de la production, le transport vers les zones de consommation, la diffusion entre les points de consommation. Certaines productions agricoles doivent en outre subir une ou plusieurs transformations par l'industrie agroalimentaire sur un ou plusieurs sites. Dans ce cas, il convient d'en tenir compte dans la distance de transport.

Les principales contraintes associées sont :

- la densité de production,
- la densité des points de consommation,
- la densité et la structure des réseaux de transport et de distribution.

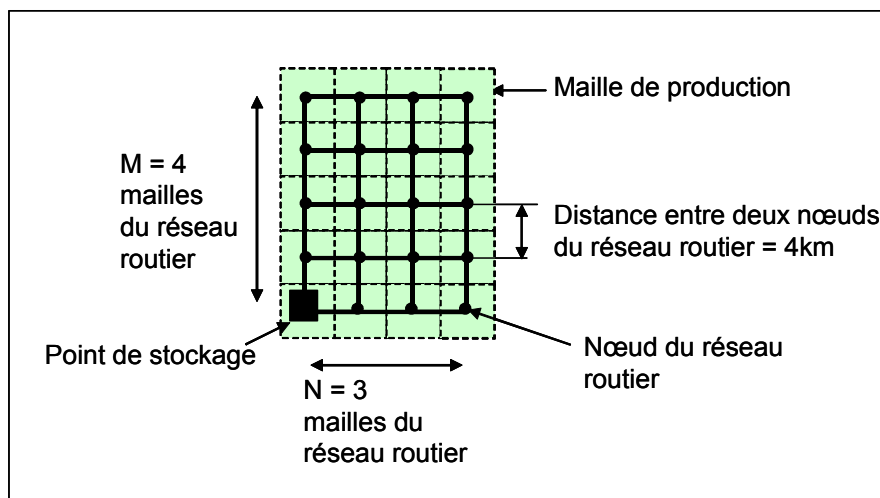
Dans la mesure où on ne peut traiter dans le détail cet aspect, on propose d'étudier l'influence des contraintes ci-dessus pour un cas très simple. Il s'agit notamment de montrer l'influence de la densité du réseau de transport, d'une part, et de la position des points de stockage, d'autre part, sur **les besoins en termes de transport**.

Tableau 2-5 – Principaux symptômes associés aux carences en nutriments, sources alimentaires et facteurs d'amélioration ou de réduction de l'absorption des nutriments (FAO/WHO, 2001 ; Kennedy et al., 2003)

Nutriments	Symptômes associés aux carences	Source alimentaire	Facteur d'absorption	
			amélioration	réduction
Vitamine A (rétinol) Pro vitamine A (caroténoïdes)*	enfants (cécité , diarrhée, infections respiratoires, rougeole), femmes enceintes (diminution de la vision nocturne)	œufs, lait, poisson, foie de poisson et d'animaux, aliments enrichis fruits et légumes jaunes (carottes, potirons, melons, mangues, ...) et végétaux à feuilles vertes (épinards)	matières grasses	
Vitamine C (acide ascorbique)	épidémies de scorbut (observés en période de guerre ou dans les camps de réfugiés)	nombreux fruits et légumes (agrumes, kiwis, cerises, mangues, pommes de terre, choux, tomates, ...)		
Folate et acide folique (plus stable et meilleure biodisponibilité)	défauts de croissance du système nerveux des fœtus et des jeunes enfants, anémie associée à la carence en folate	végétaux frais verts (pertes importantes au cours des manipulations et de la préparation)		
Fer	anémie associée à la carence en fer, niveau d' hémoglobine dans le sang faible	viande, volaille, poisson (bonne biodisponibilité), légumineuses, fruits, céréales (biodisponibilité faible)	vitamine C	phytate (produit à base de céréales) et tanins (thé, café, vin rouge)
Iode	gonflement de la glande thyroïde , réduction des capacités mentales	produits de la mer, sel iodé et petites quantités dans : lait, œufs, viande et céréales		
Zinc	ralentissement de la croissance , déficiences du système immunitaire	viandes rouges, céréales, légumineuses, légumes	protéines animales	phytate (produits à base de céréales)

* la capacité de l'organisme à absorber et à transformer les caroténoïdes en rétinol sont variables, les coefficients d'équivalence entre les caroténoïdes et le rétinol doivent faire l'objet de nouvelles études (Scott et Rodriguez-Amaya, 2000, Kennedy et al., 2003)

Figure 2- 2 – Configuration de la zone de production et du réseau hypothétiques



Pour ce faire, on suppose que l'on souhaite collecter une production agricole avec un réseau de transport hypothétique, simplissime, constitué d'un maillage carré de $d = 4$ km de côté et de 3 mailles par 4, conformément à la Figure 2- 2. La production ramenée à chaque noeud du réseau est égale au produit de la surface d'une maille par le rendement de production (prenons par exemple un rendement de 2 tonnes par ha). Dans ce cas, la production pour chaque maille est de 3200 t à collecter pour chaque nœud du réseau.

La distance totale à parcourir pour couvrir tous les points d'un réseau de taille $N \times M$ en partant du point de collecte situé comme indiqué ci-dessus peut s'exprimer comme suit :

$$Dt = d D(N,M) \quad \text{avec } D(N,M) = (N+1)(M+1)(N+M)/2$$

où d est la longueur d'un côté de la maille du réseau routier [km].

Dans le cas hypothétique décrit ci-dessus, le besoin en transport pour la collecte s'élève à :

$$BT_{collecte} = (4 (3+1)(4+1)(3+4) / 2) 3200 = 896000 \text{ tonne-km.}$$

Si on renouvelle le calcul avec un réseau plus dense avec une maille de 2 km puis de 1 km on obtient respectivement un besoin de transport de 705600 tonne-km et 618800 tonne-km. On montre ainsi que l'augmentation de la densité du réseau de collecte permet de réduire les besoins de transport pour la collecte.

Il convient en outre de noter que les distances totales parcourues par les transporteurs devront être doublées par rapport aux distances calculées (aller du point de stockage jusqu'aux nœuds du réseau à vide) et que dans le cas où les camions peuvent transporter 20 tonnes, 160 aller-retour devront être effectués. La distance totale à parcourir s'élève donc à 89600, 70560 et 61880 km pour le cas des réseaux dont les côtés des mailles sont respectivement de 4, 2 et 1 km.

Le modèle simple de réseau proposé permet de montrer que la densité du réseau de transport a une influence non négligeable en termes de besoins de transport. En effet le passage d'une maille carrée de 4 km de côté à une maille carrée de 2 km de côté se traduit par une réduction du besoin en termes de transport pour la collecte d'environ 22%. L'augmentation de la densité du réseau routier a, d'autre part, un coût dont il conviendra de tenir compte dans une étude plus approfondie.

Afin de tenir compte de la position du point de collecte dans le réseau, on généralise la proposition ci-dessus. Pour ce faire, on définit les deux fonctions suivantes :

$$L(N) = N(N+1)/2$$

et

$$Dg(N,M,n,m) = D(N-n,M-n) - L(N-n) + D(N-n,m) - L(m) + D(n,m) - L(n) + D(n,M-m) - L(M-m)$$

Les notations N , M , n , m sont détaillées dans la Figure 2- 3. On en déduit l'influence de la position du point de stockage sur le besoin de transport pour la collecte, la différence entre le point le plus défavorable et le point le plus favorable est de 37 % pour un réseau de 4 mailles par 3.

Figure 2- 3 – Paramètres de $Dg(N,M,n,m)$

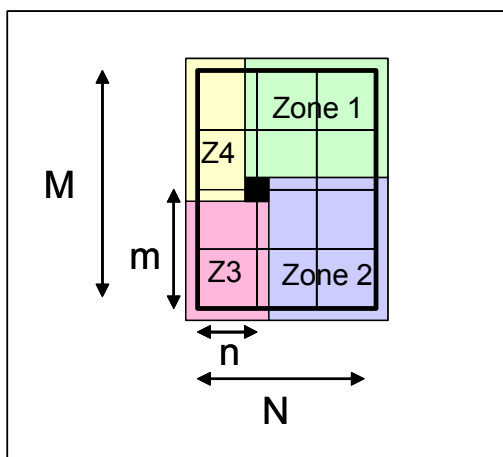


Figure 2- 4 - Calcul de $Dg(N,M,n,m)$ pour les 6 cas d'un réseau 3 par 4, le dernier cas correspond à celui présenté sur la Figure 2- 3

n	0	1	0	1	2	1
m	0	0	1	1	1	2
$Dg(3,4,n,m)$	70	60	58	48	48	44

On peut éventuellement envisager d'affiner cette démarche en utilisant des images satellites. Des images satellites de précision correcte sont désormais disponibles et en accès libre sur Internet pour l'ensemble de la surface du globe (Google maps). Deux voies d'amélioration pourront être explorées, la première visant à rechercher des distances caractéristiques conformes aux observations et la deuxième visant à modéliser le besoin de transport pour la collecte dans le cas de mailles non carrées et de tailles variables.

Répartition dans le temps de l'approvisionnement alimentaire

Deux types d'échéance doivent être pris en compte pour planifier l'approvisionnement alimentaire dans le temps. Dans un premier temps, il convient de garantir l'adéquation de la demande avec l'offre au cours d'une année. En effet, les besoins de la population sont répartis de façon homogène tout au long de l'année alors que la **production est saisonnière**. Cela implique la mise en œuvre d'une **capacité de stockage et de conservation** pour assurer la répartition de l'approvisionnement tout au long de l'année.

Dans un deuxième temps, l'approvisionnement doit être planifié pour **satisfaire les besoins sur le moyen terme** et notamment dans les pays encore en **transition démographique** pour lesquels la demande alimentaire est croissante. En fait l'augmentation de la population n'est pas le seul facteur d'augmentation de la demande, il faut également tenir compte de l'augmentation de la demande associée au développement dans les zones où la couverture des besoins n'est pas satisfaisante. En outre la demande en production végétale augmente également lorsque le régime alimentaire de la population devient plus fortement carné.

2.2 Contraintes de la production agricole végétale

2.2.1 Les besoins des cultures

Les végétaux font partie des êtres autotrophes. Cela signifie qu'ils n'ont pas besoin pour s'alimenter de matière organique synthétisée par d'autres êtres vivants. Les principaux éléments de la nutrition des plantes sont : le rayonnement solaire comme source d'énergie, le CO₂ disponible dans l'atmosphère, l'eau disponible dans le sol, et les composés azotés disponibles dans le sol sous forme de NH₄⁺ ou de NO₃⁻. En plus de ces éléments, les végétaux ont besoin de plusieurs minéraux essentiels à leur croissance et disponibles dans le sol en quantités variables. Les besoins en eau sont traités séparément dans le paragraphe 2.2.4.

Besoins en rayonnement solaire des cultures

Le rayonnement solaire reçu par les plantes constitue leur seule source d'énergie. Le rayonnement capté par les feuilles fournit l'énergie nécessaire pour la transformation du CO₂ présent dans l'air en glucides.

La quantité de rayonnement solaire reçue par les cultures a une influence directe sur les rendements agricoles (Figure 2- 5 et Figure 2- 6). Elle dépend de la surface foliaire exposée ainsi que de la durée et de l'intensité de l'ensoleillement reçu au cours de la saison de culture. Ces deux variables peuvent être évaluées par le calcul pour un plan horizontal, à une latitude donnée, et, pour tout plan d'inclinaison et d'orientation données, respectivement par rapport à l'horizontale et par rapport au Sud (dans l'hémisphère Nord). Cependant les courbes d'ensoleillement ainsi obtenues ne tiennent pas compte de la nébulosité.

Figure 2- 5 - Effet de la concentration en CO₂ sur la photosynthèse d'algues (chlorelles) pour différentes valeurs d'éclairement (comprises entre 280 et 700 $\mu\text{mole m}^{-2}\text{s}^{-1}$) (Moreau et Prat, 2004)

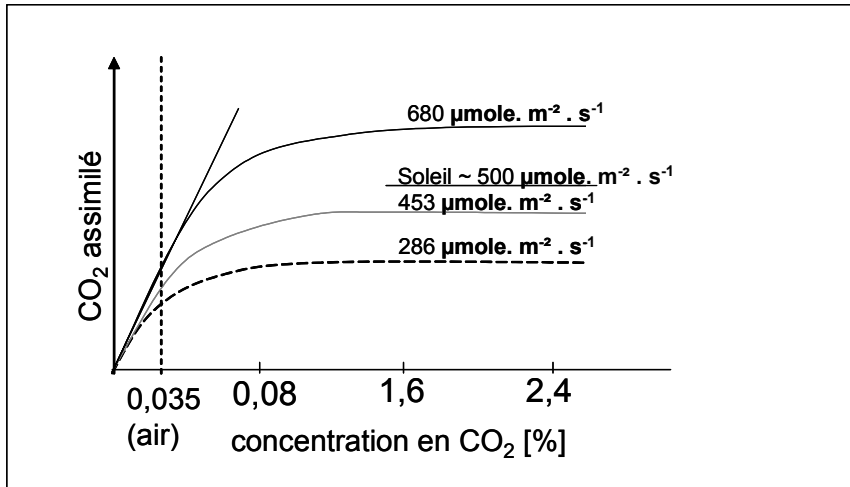


Figure 2- 6 - Influence de l'éclairement sur la photosynthèse nette (Moreau et Prat, 2004)

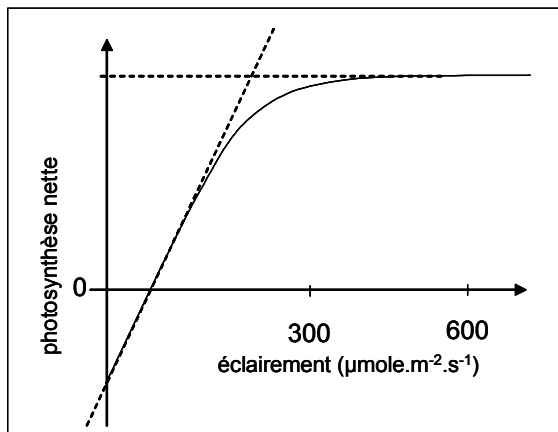
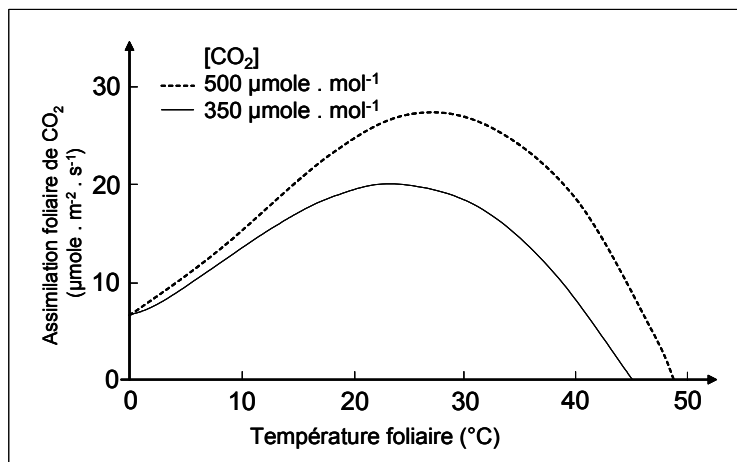


Figure 2- 7 - Taux d'assimilation foliaire du CO₂, à saturation lumineuse en fonction de la température foliaire à deux concentrations atmosphériques en CO₂ (d'après Long, 1991 cité par Unsworth et Hogsett, 1997)



Durées et intensités d'ensoleillement, couplées aux températures moyennes observées, sont les principaux facteurs de la maturité des cultures. Au champ, une réduction de l'espacement entre les plantes conduit à une diminution de la surface de feuillage exposée par plante. La concurrence avec d'autres espèces végétales conduit au même effet. Dans certains cas, le rayonnement solaire disponible peut devenir un facteur limitant de la production.

Les besoins en CO₂ des cultures

Par le mécanisme de la photosynthèse, la plante transforme le CO₂ de l'air et l'énergie du rayonnement solaire en chaînes carbonées à fort contenu énergétique. Les feuilles captent le CO₂ de l'air par les stomates. Les besoins en CO₂ sont liés à l'intensité du flux lumineux reçu par la feuille. Suivant les conditions (ensoleillement, température, disponibilité en eau, ...), la disponibilité en CO₂ peut être un facteur limitant de la croissance végétale (Figure 2- 5). De nombreux travaux (Tubiello et Ewert, 2002) étudient l'influence de l'augmentation prévue de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère sur la productivité et les besoins en eau des cultures. Ces travaux montrent qu'une augmentation de la concentration de 350 ppm à 660 ppm se traduit par une amélioration des rendements de 15 à plus de 30% et de la productivité de l'eau de 40 à 50% (Van De Geijn et Goudriaan, 1997). Cependant dans des études intégrant l'accroissement de la concentration en CO₂ d'une part et l'accroissement de température prédit par les modèles climatiques d'autre part, les résultats sont plus partagés et conduisent même pour certaines cultures et certains contextes à des réductions de productivité par unité de surface cultivée et par unité de volume d'eau consommée. Les variations de rendement dépendent notamment de l'itinéraire photosynthétique des plantes (C3, C4 ou CAM) et de la disponibilité en azote assimilable par les cultures dans le sol (Kimball et al., 2002).

Les besoins en minéraux et en nutriments des cultures

Pour leur développement, les cultures ont également besoin de sels minéraux présents dans le sol en quantités variables. Ces éléments minéraux se retrouvent dans la composition des plantes sous forme de macro ou d'oligo éléments (Tableau 2-6). Les trois éléments que les cultures consomment en plus grandes quantités sont les engrais azotés, les engrais à base de phosphore et les engrais à base de potassium.

Trois formes chimiques de l'azote utilisées en agriculture sont l'ammonitrate, le sulfate d'ammoniaque et l'urée. Les deux premières formes d'azote sont accessibles immédiatement aux racines des plantes. Cependant ces formes d'azote s'évacuent assez rapidement de la zone des racines des cultures par lessivage ou par dénitrification. La troisième forme d'azote, l'urée, d'origine organique est plus stable et doit être décomposée par un processus enzymatique plus long (Moughli, 2000).

2.2.2 Disponibilité et qualité des terres cultivables

D'après la FAO (FAOSTAT, 2004), actuellement, à l'échelle de la planète, 1530 Mha, soit environ 11% de la surface des terres émergées, sont cultivés. Un rapport récent, rédigé par Dixon et al. (2001), reprend les principaux éléments en termes d'extension des terres cultivées.

Tableau 2-6 - Composition élémentaire du plant de blé (Laval-Martin et Mazliak, 1995)

Composition élémentaire du plant de blé

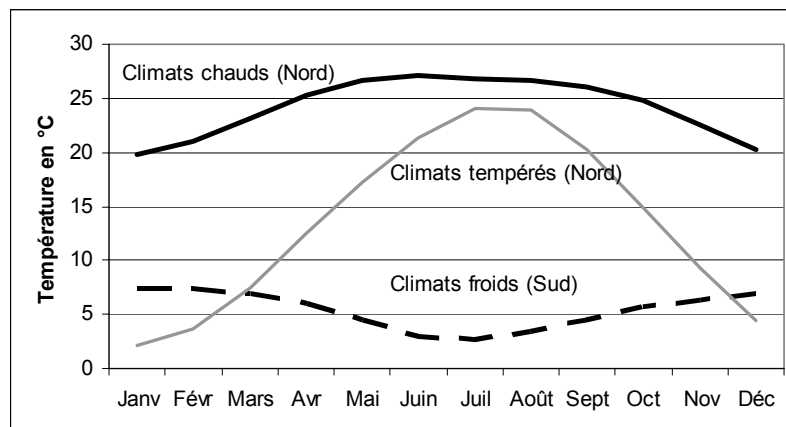
Sources minérales			% du poids de matière sèche		
Eau, air	oxygène	O	<i>Elements plastiques</i>	<i>Macro-éléments (plus de 96%)</i>	
CO ₂	carbone	C			44,4
Eau	hydrogène	H			43,6
Air, nitrates	azote	N			6,2
Phosphates	phosphore	P			1,5
<i>Sels minéraux des roches</i>				0,2	
		potassium	K	0,9	
		calcium	Ca	0,2	
		magnésium	Mg	0,17	
		soufre	S	0,16	
		fer	Fe	0,08	
		silicium	Si	1,17	
		aluminium	Al	0,1	
	chlore	Cl	0,14		
	manganèse	Mn	0,03		
	éléments indéterminés	...	0,9	<i>Oligo-éléments (4%)</i>	

Tableau 2-7 – Surfaces cultivées et potentiel d'extension dans les pays en développement

Références	Terres cultivées	Potentiel restant	Progression	
	2000	2000	1961 - 1997	1997 - 2030
	WRI, 2004 Mha	Rerat, 1994 Mha	Dixon et al., 2001 % an ⁻¹	Dixon et al., 2001 % an ⁻¹
Afrique sub- saharienne	177	581	0,73	0,65
Moyen Orient et Afrique du Nord	98	3	0,42	0,22
Asie du Sud	477*	48**	0,18	0,13
Asie de l'Est et Pacifique			0,91	0,07
Amérique Latine et caraïbe	43	36	1,26	0,55

* valeur pour l'ensemble de l'Asie, ** toute l'Asie à l'exception de la Chine

Figure 2- 8 – Moyenne des températures pour les climats froids (18 villes) de l'hémisphère Sud, et pour les climats tempérés (807 villes), et chauds (1200 villes) de l'hémisphère Nord (données CLIMWAT, FAO)



On retient notamment que les surfaces cultivées ont nettement progressé au cours des quatre dernières décennies, mais que le potentiel de terres cultivables non encore utilisées est limité et que le rythme de l'extension des terres cultivées sera amené à ralentir au cours des 30 prochaines années. Cela vient notamment du fait que 70% des terres non exploitées dont la qualité est jugée suffisante pour l'agriculture présentent une ou plusieurs contraintes en termes de qualité du sol ou de configuration physique du terrain.

Par ailleurs, la qualité des sols est une contrainte majeure de l'agriculture. Elle relève essentiellement de facteurs physiques, chimiques et organiques. Concernant les caractéristiques chimiques des sols, il convient de garantir une teneur en minéraux (principalement azote, phosphore et potassium) et de limiter le niveau de la salinisation qui peut se produire notamment par l'effet de concentration des sels dû à la succession des périodes de saturation et d'évapotranspiration.

En irrigation, ce sont principalement les caractéristiques physiques des sols qui sont utiles pour le dimensionnement des systèmes et le pilotage des apports en eau. La texture du sol, qui correspond aux proportions en éléments de différentes granulométries, permet de définir la réserve en eau du sol qui est utilisable par la plante. Cet aspect sera développé dans le § 2.2.4 portant sur le bilan hydrique de l'ensemble sol-plante-atmosphère.

2.2.3 Le climat

On désigne par climat les valeurs moyennes sur une grande période (souvent 30 ans) des principales données météorologiques. Ces valeurs sont généralement données mois par mois. Les caractéristiques du climat qui varient en fonction des zones géographiques du globe ont, bien sûr, une influence importante sur la production végétale. D'une part le rayonnement solaire et la température conditionnent la croissance végétale et d'autre part le rayonnement solaire, la température de l'air, l'humidité de l'air, la vitesse du vent sont les principaux paramètres physiques de l'évapotranspiration. Enfin les précipitations constituent le principal apport en eau des cultures.

Les principaux types de climats

Il existe sur la surface du globe une grande variété de climats. Les principaux facteurs qui permettent de les distinguer entre eux sont :

- la répartition des températures au cours de l'année,
- la répartition de la pluviométrie au cours de l'année.

On distingue les climats froids (températures moyennes faibles toute l'année), les climats tempérés (une saison chaude et une saison froide) et les climats chauds (températures moyennes élevées toute l'année).

Les principaux facteurs qui conditionnent le climat au niveau d'un point du globe sont la latitude de ce point et sa position par rapport aux océans. Au niveau de l'équateur, la température est élevée pendant toute l'année avec très peu de variations saisonnières. Lorsque l'on s'éloigne de l'équateur on trouve les climats dits tropicaux caractérisés par des températures élevées et une saison sèche prolongée. Parmi les climats tropicaux, certains présentent une saison pluvieuse marquée, durant laquelle les précipitations peuvent être assez intenses (mousson), et d'autres sont secs pendant toute l'année.

Figure 2- 9 – Evapotranspiration de référence et pluviométrie, annuelles, pour 3260 villes du monde (hors Etats-Unis). Proposition d'un découpage basé sur le rapport entre la pluviométrie et l'évapotranspiration (données CLIMWAT, FAO).

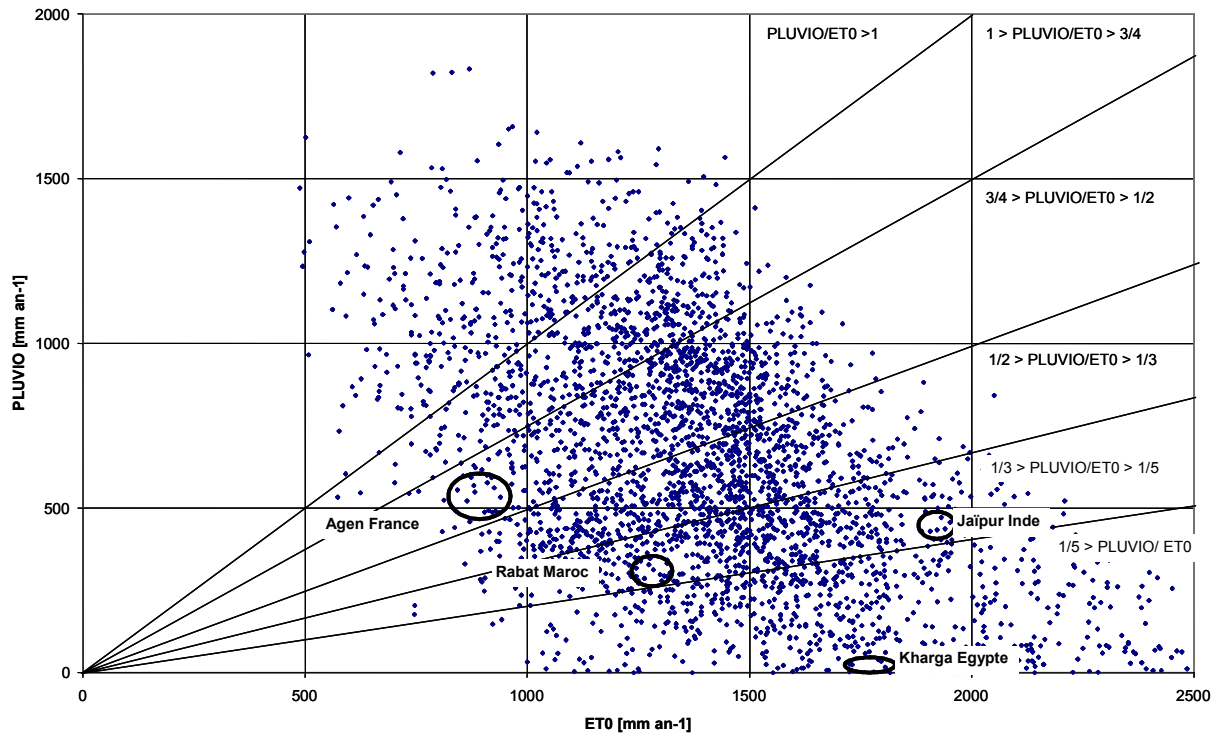
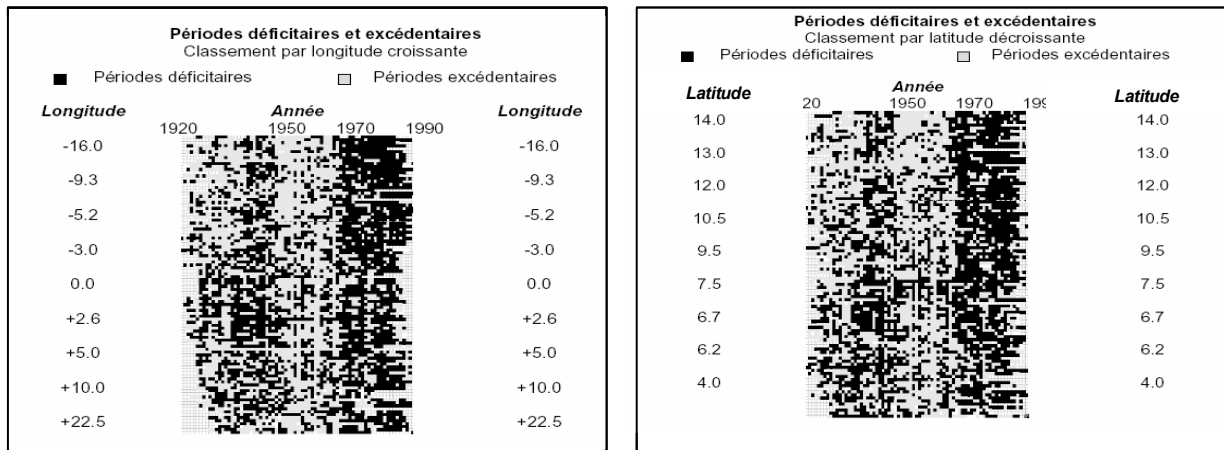


Figure 2- 10 - Analyse des déficits et des excédents pluviométriques en Afrique de 1920 à 1990 d'Ouest en Est et du Nord à l'Equateur (Paturel et al., 1996)



Si on s'éloigne encore de l'équateur, on trouve les climats tempérés. La pluviométrie peut y être répartie de façon plus ou moins homogène au cours de l'année, avec une saison plus pluvieuse en hiver (Europe) ou en été (Chine). Enfin, si l'on s'éloigne encore de l'équateur on trouve les climats froids pour lesquels la température reste très basse toute l'année.

En agriculture pluviale et irriguée, une attention particulière doit être accordée aux répartitions mensuelles de la pluviométrie et de l'évapotranspiration. Nous proposons de distinguer, d'une part, les climats chauds et tempérés et, d'autre part, les climats secs, les climats humides et les climats intermédiaires. Pour repérer cette distinction, on établit un classement des climats des différentes villes en fonction du rapport entre la pluviométrie et l'évapotranspiration (Figure 2- 9).

Nous avons également réalisé un classement des villes de l'hémisphère Nord, en prenant soin de distinguer les climats sans saison sèche marquée, ceux dont la saison des pluies se produit plutôt en hiver et ceux dont la saison des pluies se produit plutôt en été. Dans la Figure 2- 11, quatorze climats sont ainsi répertoriés suivant ce classement.

L'appartenance d'une zone à tel ou tel type de climat, permet de définir si l'agriculture pluviale y est possible et si l'irrigation doit être envisagée soit pour un apport en eau de complément, soit pour un apport de fond.

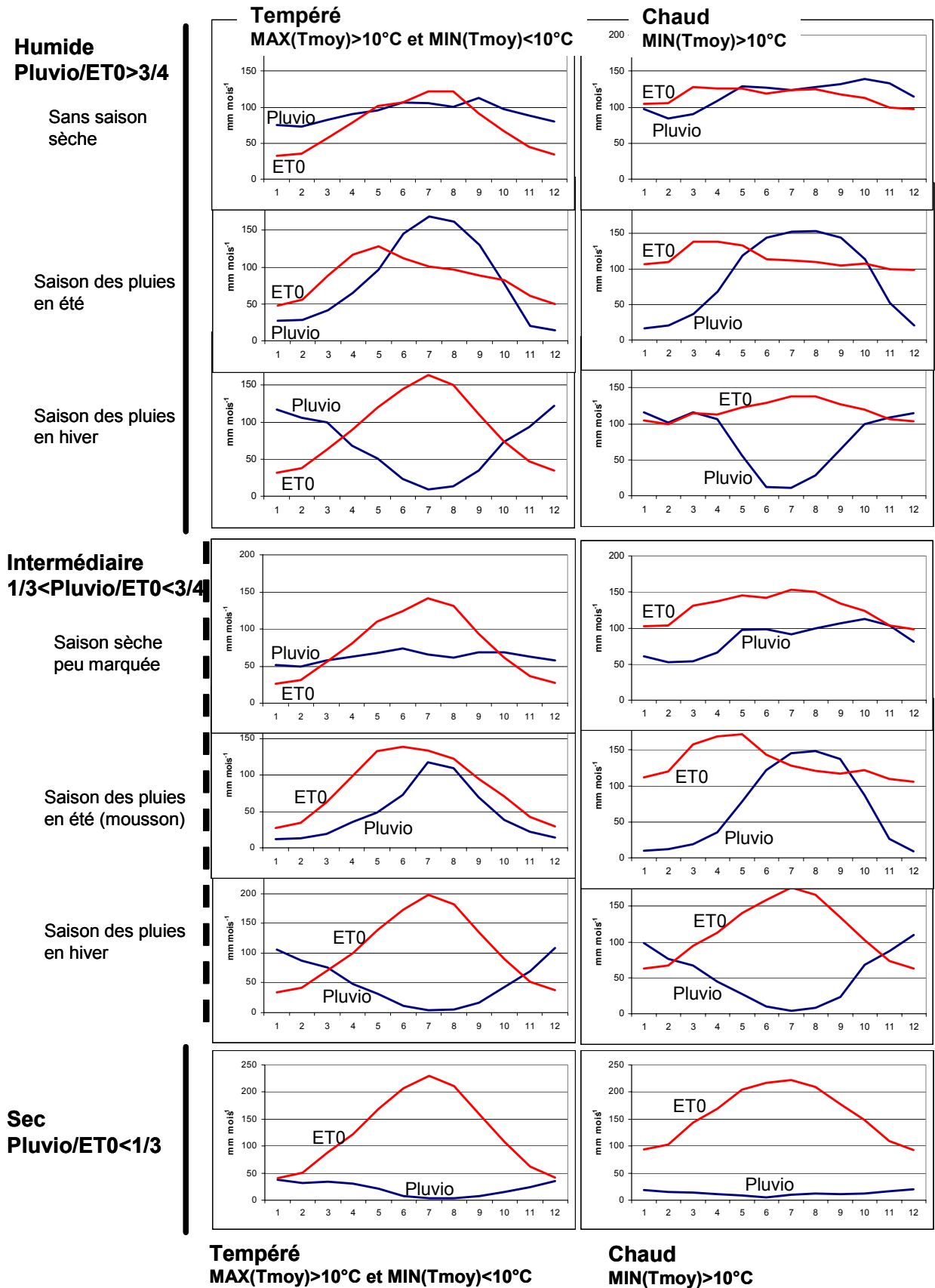
Pour affiner cette description assez générale, et évaluer les besoins en termes d'irrigation à l'échelle d'un projet local, il convient de disposer des données climatiques propres à la zone étudiée. Dans un travail de planification et de dimensionnement de l'irrigation, on cherchera notamment à déterminer la fréquence des années sèches. Le dimensionnement consiste alors à proposer un débit par unité de surface qui permet d'obtenir un niveau de risque acceptable pour les cultures.

Le changement du climat

Depuis une centaine d'années, la montée en puissance des activités humaines, principalement dans les pays industrialisés, a été corrélée à une consommation d'énergie fossile croissante. L'utilisation, par combustion, des stocks de matière organique présents dans les couches géologiques conduit à la production et au rejet dans l'atmosphère de quantités importantes de CO₂. Depuis le début de la période industrielle, la concentration moyenne en CO₂ dans l'atmosphère est passée de 280 ppm (10⁻⁶mole/mole) à 360 ppm en 2000. On remarque également qu'au cours de la même période les concentrations atmosphériques en méthane (de 0,75 à 1,75 ppm), et en oxyde nitreux (de 0,27 à 0,31 ppm) ont également augmenté (IPCC, 2001). Le CO₂, le méthane, et les oxydes nitreux constituent avec la vapeur d'eau les principaux gaz dits à effet de serre.

Du point de vue climatique, cette augmentation de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre se traduit par une modification significative directe du bilan radiatif terrestre. En effet, les gaz à effet de serre captant une partie significative des rayonnements infrarouges émis par la surface terrestre et les réémettant tant vers le sol que vers la haute atmosphère contribuent à l'augmentation de l'énergie solaire accumulée et, de fait à l'augmentation de la température, dans le système « surface terrestre – atmosphère ».

Figure 2- 11 – Courbes de pluviométrie et d'évapotranspiration moyennes pour les principaux climats de l'hémisphère Nord. Réalisation par regroupement et moyennes des données climatiques de 1872 villes de l'hémisphère Nord (données CLIMWAT, FAO).



Un autre effet, indirect, des modifications des bilans radiatifs est à noter : l'augmentation de la température peut conduire à une augmentation de l'évaporation et du contenu en eau de l'atmosphère sous forme de vapeur ou de gouttelettes (nuages). Dans la mesure où l'eau constitue également un gaz à effet de serre, l'augmentation de sa concentration dans l'atmosphère peut contribuer à amplifier les effets liés à l'augmentation de la concentration du gaz carbonique.

Au-delà des variations habituelles du climat, d'une décennie à l'autre, on assiste dans cette dernière décennie à une prise de conscience des effets du réchauffement terrestre, que plus personne ne conteste parmi les climatologues et les spécialistes, sur les conditions de vie d'une fraction significative de la population mondiale, notamment à travers les évolutions des conditions de l'agriculture et de l'élevage (Bazzaz, 1997 ; IPCC, 2001 b) :

- augmentation de l'évapotranspiration,
- années sèches plus fréquentes,
- modification des écosystèmes (apparition de nouvelles maladies, et prolifération de ravageurs),
- évolution des calendriers culturels, ...

En outre, l'IPCC (2001 b) mentionne des études qui indiquent que les changements climatiques pourraient aggraver le niveau de sécurité alimentaire des populations les plus vulnérables. Sans chercher à faire des prospectives très élaborées, on constate déjà une telle aggravation de la situation depuis une trentaine d'années en Afrique sub-saharienne. Paturol et al. (1996) montrent clairement que le niveau de déficit pluviométrique dans cette zone est plus que préoccupant (Figure 2- 10). D'autres travaux en cours étudient l'évolution de la mousson africaine et la possibilité de prévoir, avec plus de précision et à des fins agricoles, les périodes de pluie (Le Barbe, 1997, 2002).

2.2.4 Les besoins en eau des cultures

L'eau joue plusieurs rôles dans le fonctionnement des plantes. Tout d'abord, l'eau en tant que **solvant** dans les sèves, est un vecteur de transport. Dans les sèves brutes, l'eau permet le captage de minéraux du sol et leur répartition dans la plante. L'eau joue un rôle similaire pour la répartition des matières organiques synthétisées par les feuilles et leur répartition entre les organes dans les réseaux de sève élaborée (Vilain, 1997). Enfin, dans la réaction de photosynthèse, l'eau **fournit l'hydrogène** utile pour la synthèse des molécules de glucose et d'amidon.

Pour le calcul des besoins en eau des cultures, on propose de retenir la méthode développée à la FAO par Allen et al. en 1998. Dans un premier temps, le besoin en eau est évalué pour des conditions de satisfaction de la totalité de la demande en eau des cultures. Ensuite, la prise en compte des caractéristiques du sol et de sa teneur en eau en fonction du temps, permet d'établir un bilan hydrique du trio sol-plante-atmosphère et d'ajuster le calcul de la consommation réelle des cultures en tenant compte de leur comportement pendant les périodes de stress hydrique.

Encadré 2-2 – Equation de Penman-Monteith et relation empirique de Presley-Taylor pour l'évaluation de l'évapotranspiration et adaptation de l'équation de Penman-Monteith pour le calcul de l'ET₀ (Allen et al., 1998)

$$\lambda_e ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})}$$

Equation de Penman-

Monteith

$$\lambda_e ET = \frac{\Delta(R_n - G)}{(\Delta + \gamma)}$$

Relation empirique de Presley-Taylor

ET	évapotranspiration [mm jour ⁻¹]
λ _e	chaleur latente de vaporisation de l'eau [MJ kg ⁻¹]
Δ	pente de la courbe pression de vapeur à saturation à la température de l'air [kPa K ⁻¹]
R _n	rayonnement net [MJ m ⁻² jour ⁻¹]
G	flux de chaleur provenant du sol [MJ m ⁻² jour ⁻¹]
ρ _a	masse volumique moyenne de l'air [kg m ⁻³]
C _p	chaleur massique de l'air [MJ kg ⁻¹ K ⁻¹]
e _s	pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air à saturation [kPa]
e _a	pression partielle actuelle de la vapeur d'eau dans l'air [kPa]
(e _s -e _a)	déficit de pression de vapeur d'eau pour atteindre la saturation [kPa]
r _a	résistance aérodynamique [s m ⁻¹]
r _s	résistance de surface dans la hauteur des cultures [s m ⁻¹]
γ	constante psychrométrique [kPa K ⁻¹]

Calcul de l'évapotranspiration de référence ET₀ d'après l'équation de Penman-Monteith :

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{(T_{e_c} + 273)} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}$$

T _{e_c}	température [°C]
u ₂	vitesse du vent à deux mètres du sol [m s ⁻¹]

Définition et calcul de l'évapotranspiration de référence

L'évapotranspiration est le phénomène physique qui correspond au transfert d'eau depuis le sol vers l'atmosphère par évaporation directe du sol et par transpiration du couvert végétal. L'évapotranspiration dépend, d'une part des conditions météorologiques (rayonnement solaire, température et humidité de l'air et vitesse du vent) et, d'autre part, du comportement hydrique de l'ensemble constitué par le sol et le couvert végétal. Afin de s'affranchir de la variabilité liée au comportement du sol et du couvert végétal, on définit dans un premier temps la notion **d'évapotranspiration de référence**, ET_{Ref} ou ET_0 . Par définition, l' ET_0 correspond à la hauteur de la lame d'eau évaporée au cours d'une journée par une surface de gazon tondu à 10 cm. Cette valeur peut être calculée ou mesurée directement par pesée, à l'aide d'un lysimètre, sur des échantillons de gazon. On remarque que la méthode de mesure directe de l' ET_0 est difficile à mettre en œuvre, qu'elle demande du matériel coûteux et du personnel expérimenté. La méthode de calcul la plus couramment utilisée repose sur l'équation dite de Penman-Monteith présentée dans l'Encadré 2-2.

Par ailleurs, le calcul de l' ET_0 est réalisé et diffusé quotidiennement par les stations météorologiques. Il existe en outre des bases de données des moyennes mensuelles sur trente ans de l' ET_0 pour les principales villes de chaque pays. Nous utiliserons par la suite les valeurs de la base de données CLIMWAT de la FAO.

Calcul des besoins en eau des cultures sans stress hydrique

Le besoin en eau des cultures en absence de stress hydrique est désigné par l'évapotranspiration maximale (ETM). L'ETM des cultures dépend du pouvoir évaporant de l'air et du rayonnement solaire et de coefficients qui permettent de tenir compte de la spécificité des cultures et de leur stade d'avancement. Le pouvoir évaporant de l'air et du rayonnement solaire s'exprime au travers de l'évapotranspiration de référence. Concernant les coefficients culturaux, la FAO a regroupé, dans des bases de données, les coefficients culturaux ainsi que la durée des différents stades de croissance des cultures les plus pratiquées.

L'évapotranspiration maximale pour un jour j d'avancement de la culture s'évalue en réalisant le produit de l' ET_0 pour ce jour par le coefficient cultural correspondant. Le détail de l'évaluation de l'ETM est présenté dans l'Encadré 2-3. En fait, les cultures sont rarement à l'ETM telle que calculée précédemment, et ce pour deux raisons.

Effet de l'évaporation du sol dans l'évaluation de K_c : $K_c = K_e + K_{cb}$

Premièrement, on observe qu'après une irrigation ou des précipitations, l'horizon superficiel du sol est humide ce qui occasionne une consommation en eau supérieure à celle estimée par la méthode du K_c unique. Afin de tenir compte de ce fait, la FAO propose de décomposer le coefficient K_c en un terme strictement lié à la culture (K_{cb}) et en un terme lié au sol (K_e). Cette approche conduit à la réalisation d'un bilan hydrique du sol portant sur deux horizons : un horizon superficiel d'une épaisseur de 10 cm à partir duquel l'humidité peut être évaporée directement depuis le sol vers l'atmosphère, et un horizon pour lequel l'extraction d'eau par le système de racines des cultures représente le principal flux d'eau vers l'atmosphère. Les coefficients K_{cb} ont été mesurés par la FAO et sont disponibles pour les cultures les plus pratiquées.

Encadré 2-3 - Evaluation de l'ETM utilisant la méthode des coefficients Kc (j)

j : jour d'avancement de la culture

d1, ..., d4 : durées des phase de levée, croissance, reproduction, maturation

KcA : coefficient cultural dans la phase initiale (levée)

KcB : coefficient cultural dans la phase 3 (reproduction : floraison, formation des fruits)

KcC : coefficient cultural à la fin de la phase 4 (maturation)

$$ETM (j) = Kc (j) \cdot ET0 (j)$$

Calcul de Kc (j) :

Si $j < d1$ alors $Kc(j) = KcA$

Si $d1 < j < d2$ alors $Kc(j) = KcA + (j - d1)(KcB - KcA) / d2$

Si $d2 < j < d3$ alors $Kc(j) = KcB$

Si $d3 < j < d4$ alors $Kc(j) = KcB - (j - d1 - d2 - d3)(KcB - KcC) / d4$

Figure 2- 12 - Les valeurs clés du calcul des coefficients culturaux Kc(j)

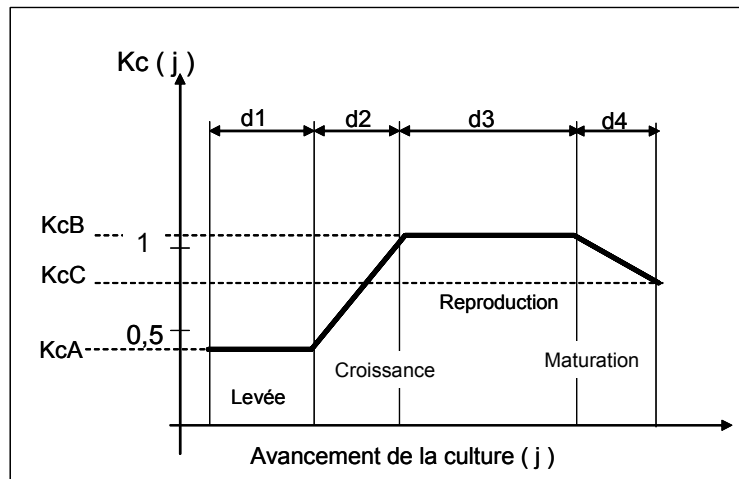
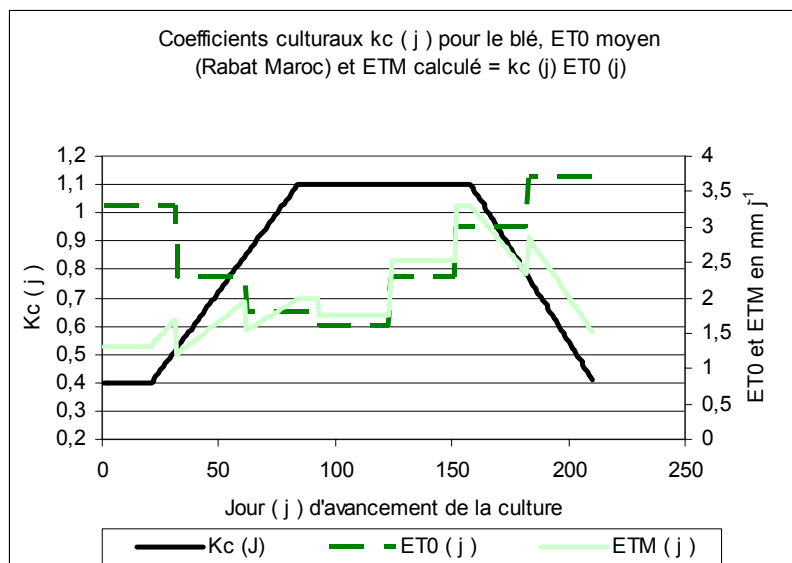


Figure 2- 13 – Exemple d'évaluation de l'ETM à partir des coefficients culturaux du blé pour la zone de Rabat (donnée climatique choisie pour le cas de la plaine du Gharb). Mise en culture début octobre, récolte fin avril (CROPWAT, CLIMWAT, FAO).



Concernant l'évaluation du coefficient d'évaporation du sol K_e , elle repose sur deux considérations physiques. Premièrement, l'énergie qui contribue à l'évapotranspiration de l'eau de l'ensemble « sol + culture » ne peut être supérieure à l'énergie disponible. Cette remarque conduit à définir une limite supérieure pour le coefficient K_c :

$$K_c = K_{cb} + K_e \leq K_{cmax} \quad \text{et donc} \quad K_e \leq K_{cmax} - K_{cb}$$

La valeur de K_{cmax} est comprise entre 1,05 et 1,3. L'évaluation de K_{cmax} repose sur l'utilisation de la formule semi-empirique proposée ci-dessous :

$$K_{cmax} = \max (\{1,2 + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(RH_{min} - 0,45)](h/3)^{0,3}\}, \{K_{cb} + 0,05\})$$

avec : h , hauteur maximum moyenne des cultures pendant la période de croissance considérée [m], K_{cb} , coefficient de base de la culture à la date considérée [SD], u_2 , vitesse du vent à 2 m du sol [m/s] et où $\max()$ représente la valeur maximum des termes entre parenthèses.

De plus, on considère que la quantité d'eau qui peut être évaporée à partir du sol dépend de la teneur en eau du sol dans l'horizon superficiel et de deux paramètres du sol : la quantité d'eau totale évaporable dans l'horizon superficiel (0,1 m) et la quantité d'eau facilement évaporable. Pour tenir compte de cet aspect, on décrit le coefficient K_e par $K_e = K_r(K_{cmax} - K_{cb})$, avec K_r , coefficient de réduction de l'évaporation du sol [SD].

K_r s'exprime de la façon suivante :

$$\begin{array}{ll} \text{si } Rhs(j) > RTE - RFE & \text{alors } K_r = 1 \\ \text{si } Rhs(j) < RTE - RFE & \text{alors } K_r = Rhs(j) / (RTE - RFE) \end{array}$$

avec : $Rhs(j)$ réserve de l'horizon superficiel du sol au jour j [mm], RTE réserve totale évaporable de l'horizon superficiel du sol [mm], RFE réserve facilement évaporable [mm].

Enfin, pour certaines techniques d'irrigation (irrigation à la raie, irrigation localisée), la totalité de la surface du sol n'est pas nécessairement mouillée. On en tient compte en majorant le coefficient K_e :

$$K_e \leq fsm K_{cmax} \quad \text{où } fsm \text{ est la fraction du sol mouillée au cours de l'irrigation [SD].}$$

Afin de déterminer l'influence du type de sol sur la consommation nette en eau d'irrigation, on propose d'appliquer la méthode détaillée ci-dessus pour un sol argileux disposant d'une forte réserve utile et pour un sol sableux avec une faible réserve utile. La culture de référence choisie est la culture du maïs. Les pertes en eau relatives à l'homogénéité de répartition et à l'imprécision du pilotage ne sont pas prises en compte. Un apport d'irrigation optimal est pratiqué chaque fois que la teneur en eau du sol atteint la limite de la réserve facilement utilisable. Par ailleurs, on utilise des données climatiques moyennes pour la ville de Bordeaux. La fréquence et l'intensité des précipitations sont déterminées par des tirs aléatoires et dans le respect des pluviométries mensuelles moyennes.

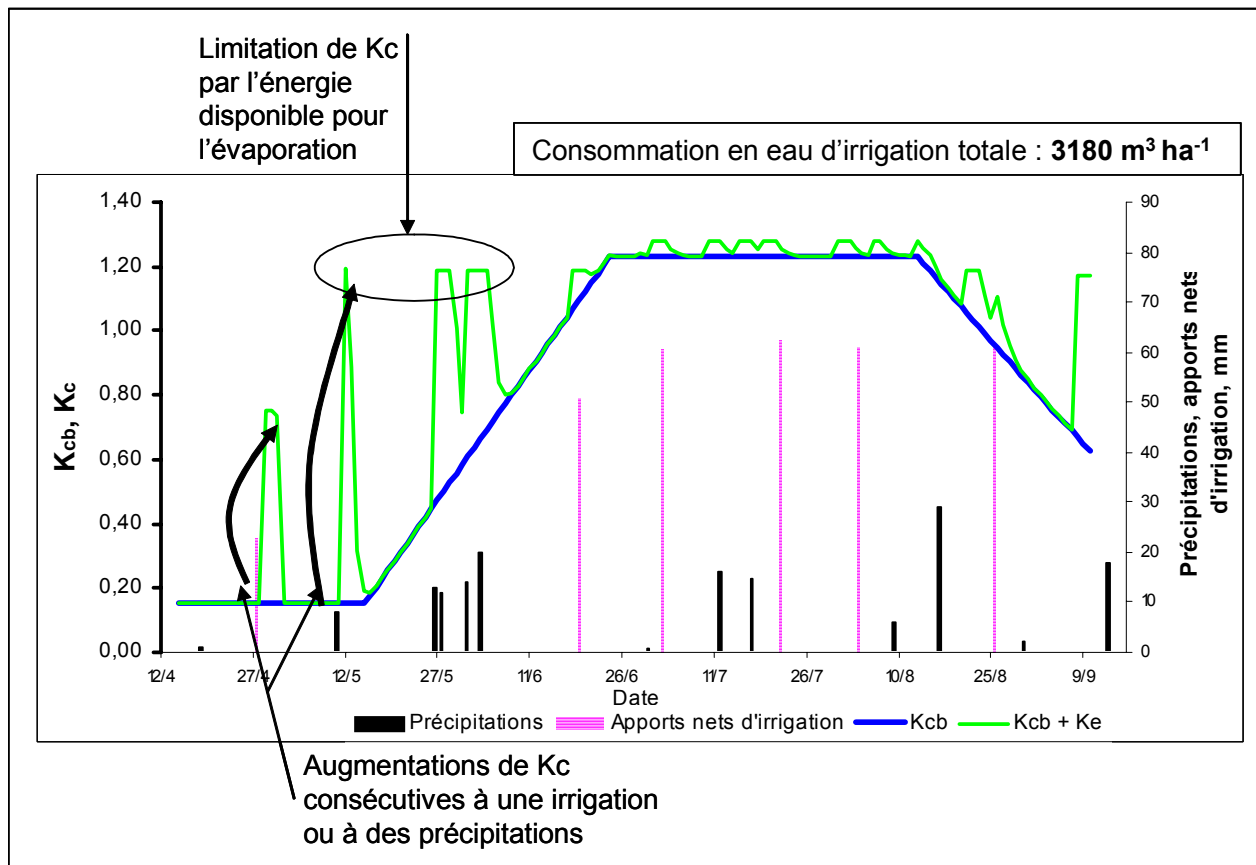
En comparant les résultats des deux simulations (Figure 2- 14 et Figure 2- 15), on observe que l'augmentation des fréquences d'irrigation qu'implique une faible réserve utile du sol augmente de façon significative la durée pendant laquelle le sol est humide. Cela conduit à une nette augmentation de la valeur moyenne de K_c . En termes de consommation d'eau, cela se traduit par une augmentation des volumes d'eau évaporés de plus de 25 %.

Tableau 2-8 – Caractéristiques et paramètres d'évaporation des trois principaux types de sol (d'après Allen et al., 1998)

types de sol (catégories simplifiées*)	Caractéristiques du sol			Paramètres d'évaporation de l'horizon superficiel (0,1 m de profondeur)	
	teneur en eau du sol saturé après égouttement (capacité au champ)	teneur en eau du sol au point de flétrissement	réserve utile ($\theta_{cc} - \theta_f$)	réserve facilement évaporable	réserve totale évaporable
	θ_{cc} [mm m^{-1}]	θ_f [mm m^{-1}]	RU [mm m^{-1}]	RFE [mm]	RTE [mm]
Sable	120	45	80	4,5	9
Limon	320	170	180	9,5	24
Argile	360	220	160	10	25,5

* En fait, les textures réelles des sols sont extrêmement variées. Ce sont le plus souvent des mélanges qui combinent les trois catégories de sol présentées ci-dessus.

Figure 2- 14 – Simulation de l'évolution du coefficient Kc et identification de quelques éléments de comportement remarquables



On remarque en outre que la répartition des précipitations a une influence significative sur la consommation en eau d'irrigation. Afin de valider l'observation concernant l'influence de la réserve utile du sol sur la consommation en eau d'irrigation une moyenne a été réalisée pour 10 répartitions différentes des précipitations et pour 6 valeurs de la réserve utile du sol. La courbe présentée Figure 2- 17 confirme la dépendance de la consommation d'eau d'irrigation à la réserve utile du sol. En moyenne, le volume d'eau d'irrigation consommé pour un sol sableux est supérieur de 20% à celui consommé pour un sol argileux.

Stress hydrique : évaluation de l'évapotranspiration réelle ETc

Deuxièmement, la teneur en eau du sol ne permet pas toujours aux cultures d'avoir une évapotranspiration maximale et il convient alors de déterminer l'influence de la teneur en eau du sol sur le comportement des cultures en termes d'évapotranspiration. Ceci revient à ajuster le coefficient Kcb en fonction de l'évolution de la teneur en eau du sol. On propose dans un premier temps d'approfondir la notion de bilan hydrique du sol.

Les deux caractéristiques essentielles pour décrire le comportement hydrique du sol sont la capacité au champ (θ_{cc}) et la teneur en eau au point de flétrissement (θ_f). La capacité au champ correspond à la teneur en eau du sol égoutté suite à une saturation.

La teneur en eau au point de flétrissement est la teneur en eau limite en dessous de laquelle les plantes ne parviennent plus à extraire l'eau du sol. La différence entre ces deux paramètres représente la réserve utile r_u du sol par mètre de sol. La réserve utile accessible aux cultures RU est celle qui est accessible aux racines soit :

$$RU = r_u Z_r = Z_r (\theta_{cc} - \theta_f)$$

avec RU réserve utile [mm], r_u réserve utile par unité de profondeur du sol [mm m^{-1}], Z_r profondeur des racines [m], θ_{cc} capacité au champ [mm m^{-1}], θ_f teneur en eau au point de flétrissement [mm m^{-1}].

Toute la réserve utile de la zone des racines n'est pas utilisée de la même façon par les cultures. Une part de la réserve utile est définie comme facilement utilisable (RFU) et une autre comme réserve difficilement utilisable (RDU). Tant que la quantité d'eau restant dans la zone des racines (S) est telle que la RFU n'est pas consommée, on considère que l'ETc (évapotranspiration réelle de la culture) est égale à l'ETM calculée précédemment. Lorsque la RFU est consommée, l'eau devient plus difficile à extraire du sol et on dit que la plante puise dans la RDU. La réduction de l'ETc dans ce cas s'exprime à l'aide un coefficient multiplicatif Ks appliqué au coefficient Kcb.

$$ETc = (K_e + K_s K_{cb}) ET_0$$

avec $K_s = 1$ si $S \geq RDU$ et $K_s = S / RDU$ si $S < RDU$, K_s coefficient de réduction de l'évapotranspiration [SD], S réserve en eau restant dans la zone des racines [mm], RDU réserve difficilement utilisable dans la zone des racines [mm], RFU réserve facilement utilisable dans la zone des racines [mm], ETc évapotranspiration réelle des cultures tenant compte du stress hydrique [mm].

Figure 2- 15 – Simulation de l'évolution du coefficient Kc et des besoins d'irrigation pour un sol de type argileux (présentant une réserve utile de 160 mm par m)

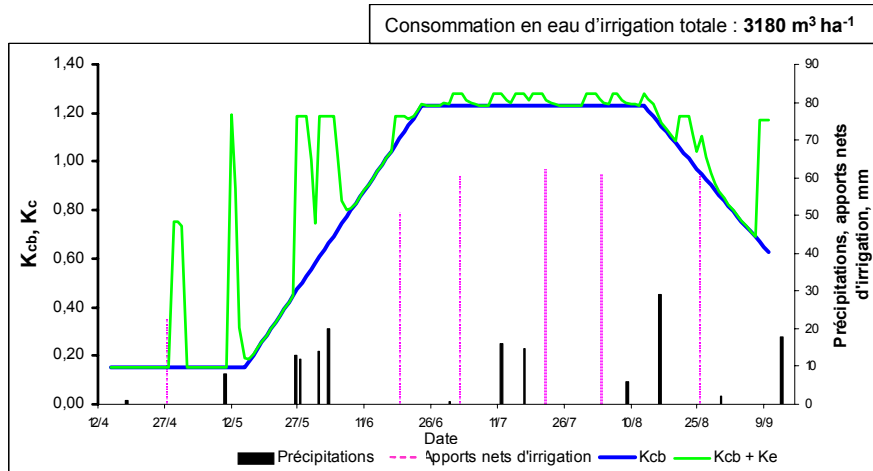


Figure 2- 16 - Simulation de l'évolution du coefficient Kc et des besoins d'irrigation pour un sol de type sableux (présentant une réserve utile de 70 mm par m)

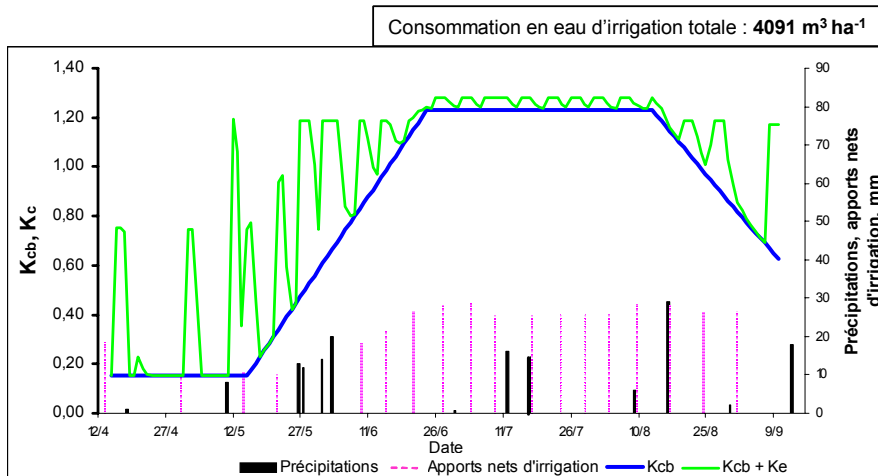
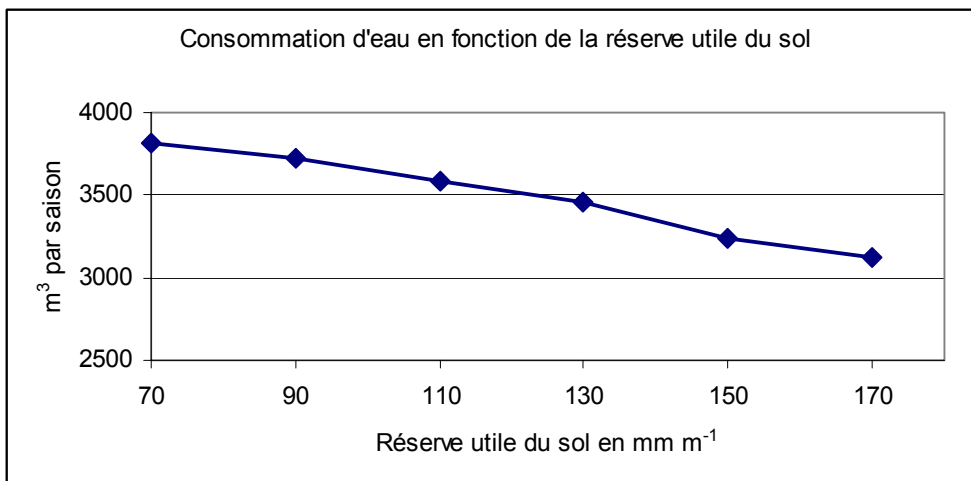


Figure 2- 17 – Moyenne sur dix répartitions des précipitations de la consommation nette en eau d'irrigation en fonction de la réserve utile du sol



Concernant l'évaluation de la RFU, on considère en première approximation que 50 % de la RU sont facilement utilisables :

$$RFU = p \text{ RU}$$

où p est la fraction moyenne de la RU qui est facilement utilisable par la plante [SD], prise en première approximation égale à 0,5.

En fait, la valeur de p dépend de la demande atmosphérique (ET₀) et du type de culture. Lorsque la demande climatique est importante, la part de la réserve utile qui est facilement utilisable a tendance à diminuer et inversement elle augmente lorsque la demande climatique est faible. Pour tenir compte de la demande climatique, Allen et al. (1998) proposent d'ajuster le facteur p de chaque culture à l'aide la fonction suivante :

$$p_{\text{ajusté}} = p + 0,04(5 - ETM)$$

Réalisation du bilan hydrique du sol

En se basant sur les méthodes décrites ci-dessus, il est possible d'établir un bilan hydrique du sol. On réalise le bilan sur la zone du sol accessible aux racines. Les apports en eau sont les précipitations, les irrigations et les remontées capillaires. On considère par la suite que les remontées capillaires sont négligeables. Les pertes en eau sont l'évapotranspiration des cultures, l'évaporation du sol, toutes deux prises en compte dans l'ET_c, et les infiltrations dans la partie du sol qui n'est pas accessible aux racines (Figure 2- 18).

$$S_{j+1} = S_j + P_j + I_j + Rm_j - ETc_j - D_j$$

avec : S_j et S_{j+1} réserves en eau restant dans le sol aux dates j et j+1 [mm], P_j précipitation [mm], I_j irrigation [mm], Rm_j remontée capillaire [mm], D_j infiltrations par drainage [mm].

Pour le calcul de D on utilise la relation suivante :

$$\begin{array}{ll} \text{- si } & S_j + P_j + I_j - ETc_j < RU & \text{alors } & D = 0 \\ \text{- si } & S_j + P_j + I_j - ETc_j > RU & \text{alors } & D = S_j + P_j + I_j - ETc_j - RU \end{array}$$

Pour l'évaluation de la profondeur des racines, on considère qu'elle évolue de façon linéaire de la date de mise en culture jusqu'à la fin de la période de croissance de la culture.

$$Zr_j = Z_0 + j (Zr_{\text{max}} - Z_0) / (d_1 + d_2)$$

Avec : Z_{rj} profondeur des racines au jour j d'avancement de la culture [m], Z₀ profondeur de la graine ou du pied lors de la mise en culture [m], Z_{rmax} profondeur maximum des racines de la culture considérée [m], d₁ et d₂ durées des périodes 1 et 2 [jours].

Ce bilan est utile pour le dimensionnement des systèmes d'irrigation et pour le pilotage des apports en eau.

2.3 Contraintes de l'irrigation

2.3.1 Relation entre l'ETM, l'ET_c et le rendement des cultures

Nous avons vu plus haut que, lorsque la réserve en eau du sol est inférieure à la réserve facilement utilisable, les cultures réduisent leur évapotranspiration. En fait, ce comportement des plantes correspond à une fermeture partielle des stomates. En plus de la réduction de la demande en eau de la plante, cela a pour effet de réduire la concentration de CO₂ dans les chambres sous-stomatales et par conséquent de réduire le rendement de conversion du rayonnement solaire et le rendement des cultures.

Figure 2- 18 –Flux en jeu dans le calcul du bilan hydrique du jour j

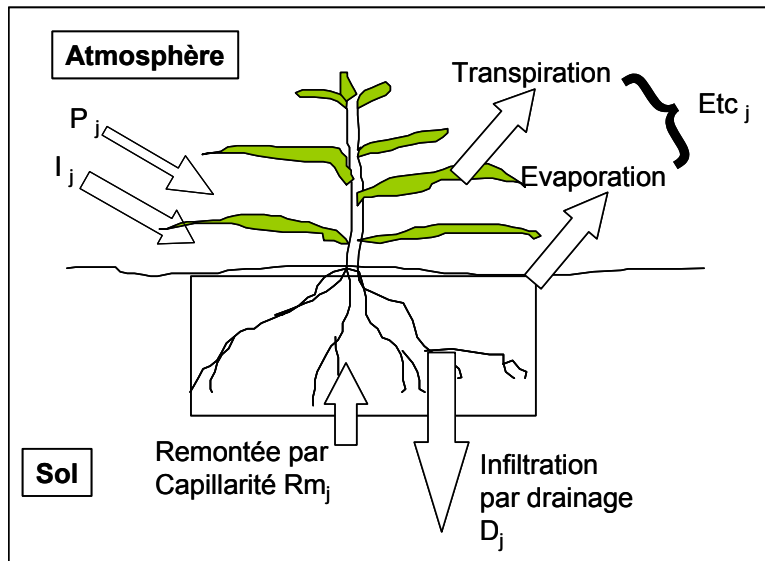
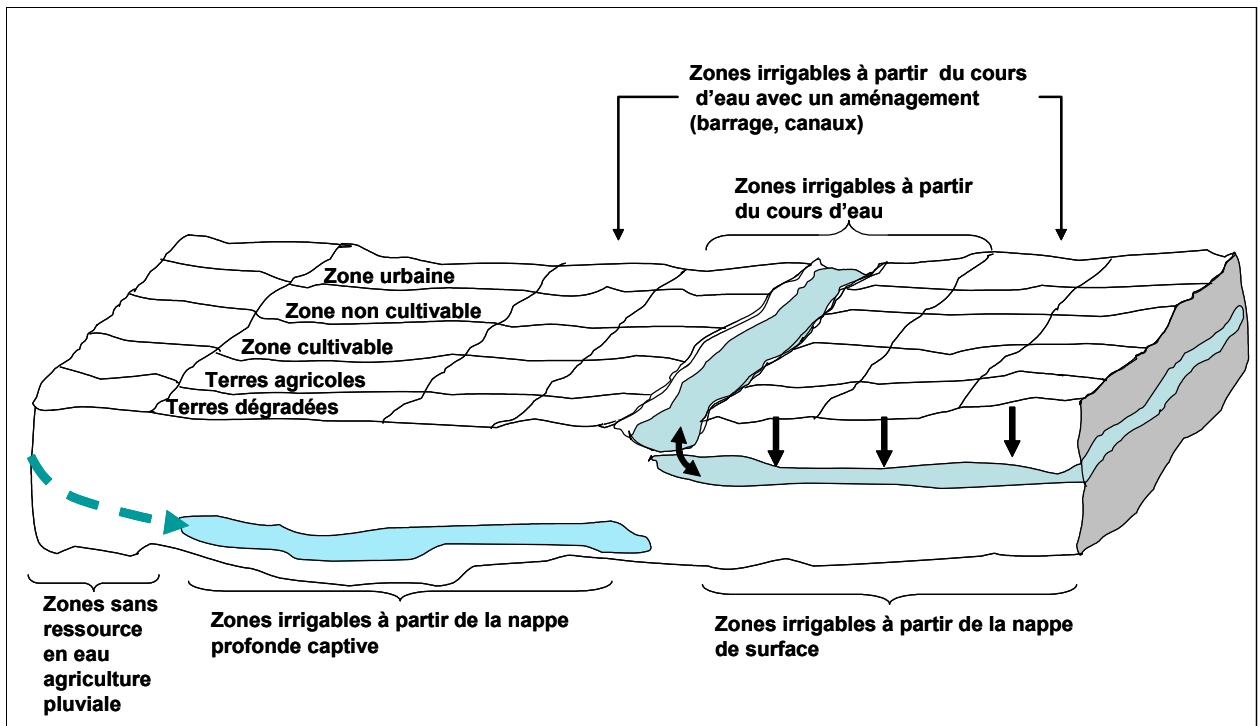


Figure 2- 19 – Les différentes ressources en eau envisageables pour l'irrigation : réseau hydrographique de surface, nappe superficielle, nappe profonde



En outre, l'influence du stress hydrique sur le rendement final des cultures varie en fonction de la période de croissance des cultures. Les rendements en grain sont généralement plus sensibles au stress hydrique pendant les périodes de floraison et de formation des grains. Ces périodes sont critiques pour les irrigants. Pour prendre en compte cet aspect, on détermine un coefficient de réduction du rendement à partir des coefficients de sensibilité du rendement propre à chaque période des différentes cultures et du rapport entre l'ETc et l'ETM.

$$C_{reduc} = \prod_{i=d1}^{d4} [1 - K_{yi} (1 - \sum_j ETc_j / \sum_j ETM_j)]$$

où C_{reduc} est le coefficient de réduction du rendement de la culture [SD] et K_{yi} le coefficient de sensibilité du rendement au stress hydrique de la culture considérée pour la période de croissance i [SD].

2.3.2 Disponibilité et accessibilité des ressources en eau

A l'échelle d'un bassin versant, les ressources en eau sont constituées par les précipitations dont une première partie s'évapore, une deuxième partie s'infiltre et alimente les ressources souterraines et une troisième partie ruisselle et contribue au débit des cours d'eau. Dans l'objectif de prévoir les allocations pour les différents usages de l'eau, il est utile de disposer d'une synthèse des flux d'eau à l'échelle d'un bassin versant ou d'une portion de bassin versant. La Figure 2- 20 permet, par exemple, de se faire une idée des flux d'eau dans la zone de Jaïpur et de sa périphérie.

Les trois principales ressources en eau mobilisées pour l'irrigation sont les ressources de surface, les ressources souterraines peu profondes, et les ressources souterraines profondes. Lorsque les surfaces cultivables le permettent, il peut être opportun de choisir quelle zone cultiver en priorité pour obtenir de bons résultats tout en favorisant un coût de mobilisation des ressources minimum. La Figure 2- 19 présente quelques configurations de disposition des ressources en eau et des ressources en sol.

On observe que, dans certaines zones, un choix devra être fait entre la mobilisation de la ressource de surface et celle de la nappe souterraine. Aux abords des cours d'eau, ce choix est du ressort de l'exploitant agricole. En revanche, pour les exploitations plus éloignées des cours d'eau, les investissements privés ne sont plus suffisants pour couvrir les coûts d'aménagement. La démarche doit alors relever d'actions collectives.

Les ressources en eau de surface

Les ressources de surface sont constituées par l'ensemble du réseau hydrographique de surface. Ce sont les rivières, les ruisseaux, les lacs et les réservoirs de surface aménagés sur les cours d'eau ou pour la collecte des eaux de pluie. Les cours d'eau sont alimentés par les précipitations collectées par les bassins versants. Les débits présentent de fortes variations mensuelles et journalières. La **répartition des débits des cours d'eau dans le temps** constitue une contrainte majeure pour l'irrigation. En effet, la période où la demande en eau des cultures est la plus élevée correspond à la période où le débit des cours d'eau est le plus faible. La Figure 2- 21 donne une idée du déphasage entre la période de demande maximale en eau d'irrigation et la disponibilité de la Garonne, en termes de débit.

Figure 2- 20 - Cycle de l'eau dans la zone périurbaine de la ville de Jaïpur (flux d'eau en Mm³ / an) (Goossens et Bonnet, 2003a)

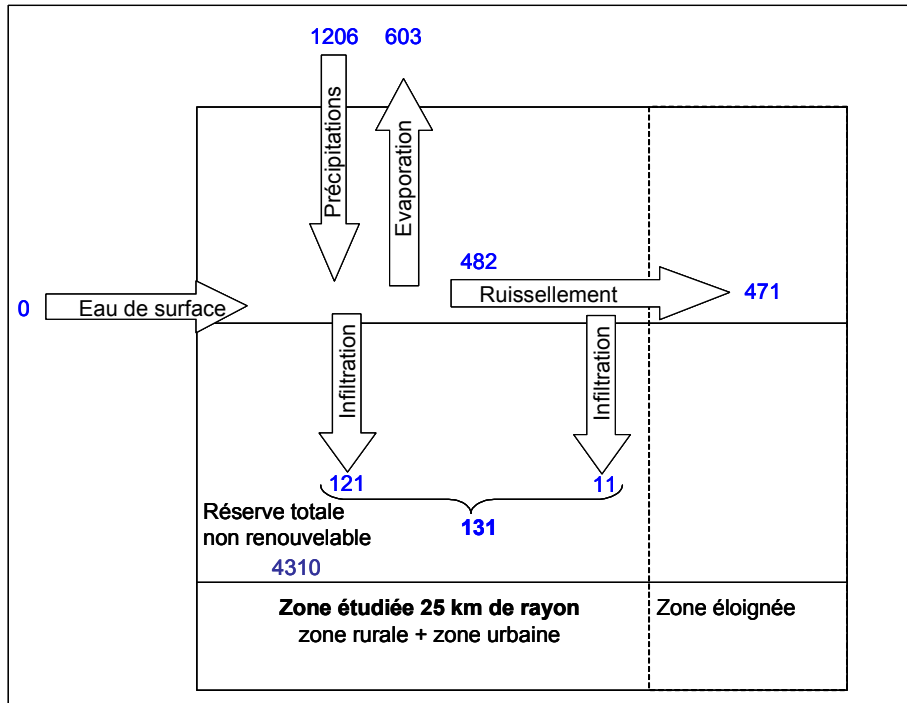
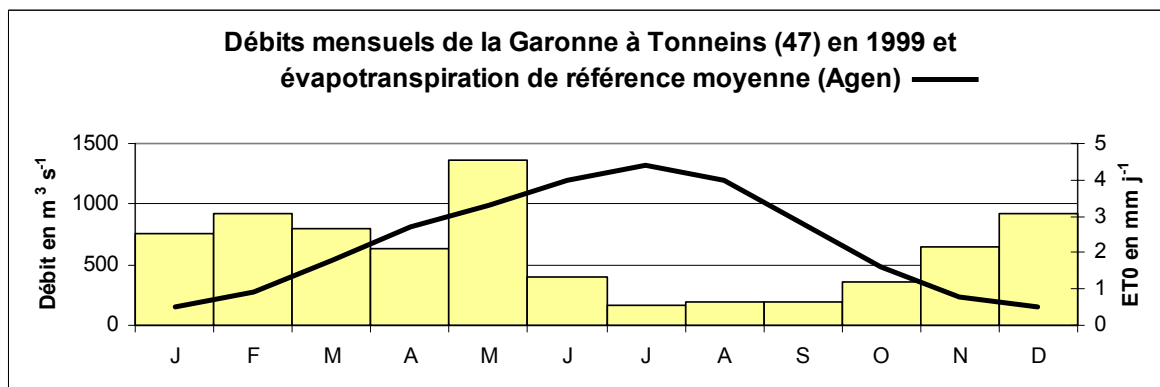


Figure 2- 21 – Mise en évidence du déphasage entre la disponibilité des ressources souterraines et les besoins en eau d'irrigation en Lot-et-Garonne. Débits mensuels de la Garonne à Tonneins (47) en 1999 (RNDE, Base de données HYDRO) et évapotranspiration de référence moyenne à Agen (47) (CLIMWAT)



Par ailleurs, il est à noter que le débit d'un cours d'eau ne peut être entièrement alloué à l'usage agricole. Il convient en effet de tenir compte des **besoins en eau des autres usages** de l'eau (domestiques, industriels, hydroélectricité, refroidissement des centrales électriques thermiques, ...) et du maintien d'un **débit minimum nécessaire à la sauvegarde des écosystèmes**. L'ensemble de ces considérations doit être pris en compte pour évaluer la quantité d'eau qui peut être allouée à l'irrigation. La solution mise en œuvre pour surmonter ces problèmes de répartition de la disponibilité dans le temps consiste à construire des ouvrages de stockage de petite, moyenne et grande capacités.

En outre, aux concurrences d'usages sur la ressource en eau, se rajoutent dans certaines situations des conflits latents portant sur le partage de la ressource entre pays. C'est notamment le cas pour le Nil entre l'Égypte, le Soudan et l'Éthiopie, trois pays en pleine croissance démographique qui ne parviennent pas à l'autosuffisance alimentaire et pour lesquels la mobilisation des eaux du fleuve pour l'irrigation est un passage obligé (Bethemont, 2003).

Une deuxième contrainte majeure associée aux ressources en eau de surface est la distance de transport de l'eau depuis les cours d'eau jusqu'aux exploitations. Les **investissements à concéder pour le transport de l'eau** constituent un deuxième facteur limitant pour l'irrigation à partir des cours d'eau. On peut considérer qu'une première bande de terre cultivable proche des cours d'eau peut être aménagée et irriguée dans le cadre d'initiatives privées et qu'une deuxième bande de terres plus éloignées nécessite des investissements réalisés dans le cadre d'initiatives collectives ou publiques. Bien entendu, les surfaces irriguées doivent respecter dans un même temps la contrainte de disponibilité en eau du cours d'eau pendant la période de plus forte demande.

Du point de vue énergétique, ce sont l'éloignement et les dénivelés qui doivent être pris en compte. On peut définir l'accessibilité physique comme un couple où figurent la distance à parcourir et la différence de hauteur entre le point de départ et le point d'arrivée de l'eau. L'évaluation du besoin énergétique pour le transport de l'eau en fonction de la distance n'est pas immédiate. En effet, l'énergie nécessaire pour transporter l'eau dépend fortement des modalités techniques mises en œuvre pour ce faire (canaux, canalisation sous pression, matériaux, dimensionnement). Cet aspect est détaillé au § 3.3.

Les ressources en eau souterraines

Les nappes d'eau souterraines correspondent généralement à des couches du sous-sol qui présentent une bonne porosité. La partie inférieure de la nappe est constituée d'une couche imperméable.

On distingue principalement deux types de ressources souterraines (Figure 2- 22) :

- les nappes libres, qui sont en relation avec la surface du sol par une couche qui présente une bonne perméabilité (sable, alluvions). Ces nappes sont généralement peu profondes, elle sont alimentées par les pluies et peuvent contribuer aux débits des cours d'eau (on parle de nappe d'accompagnement).

Figure 2- 22 – Les ressources en eau souterraines, schéma de principe de la disposition des nappes libres et des nappes captives

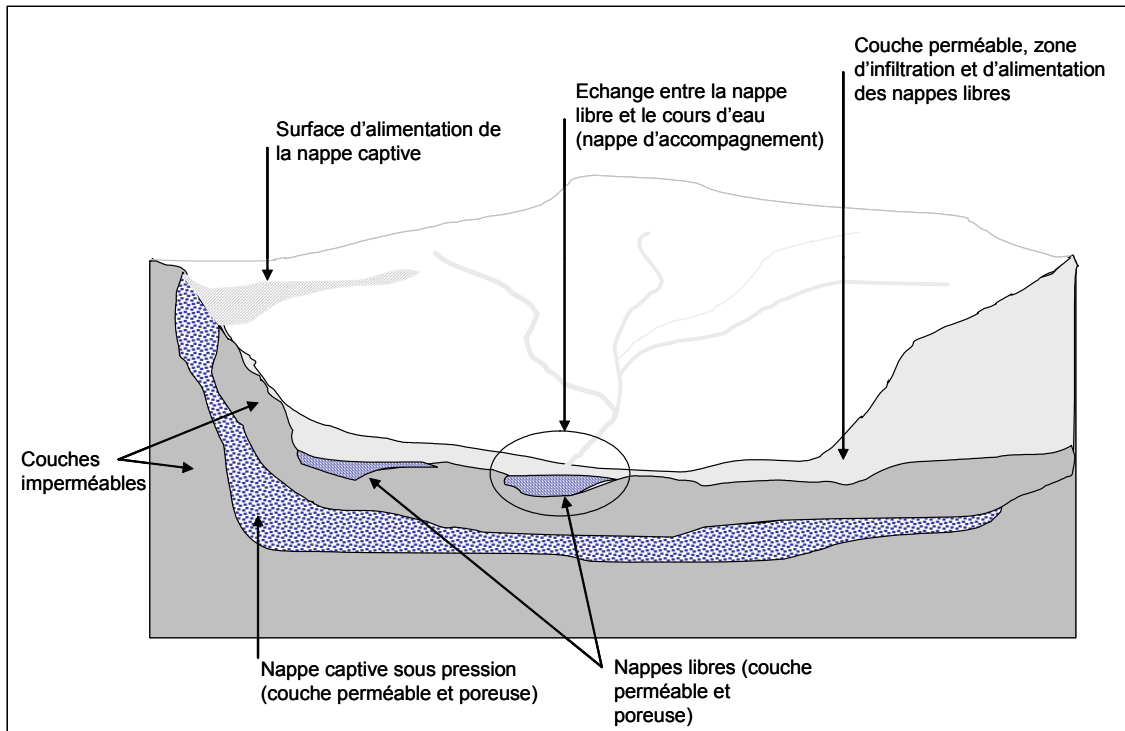
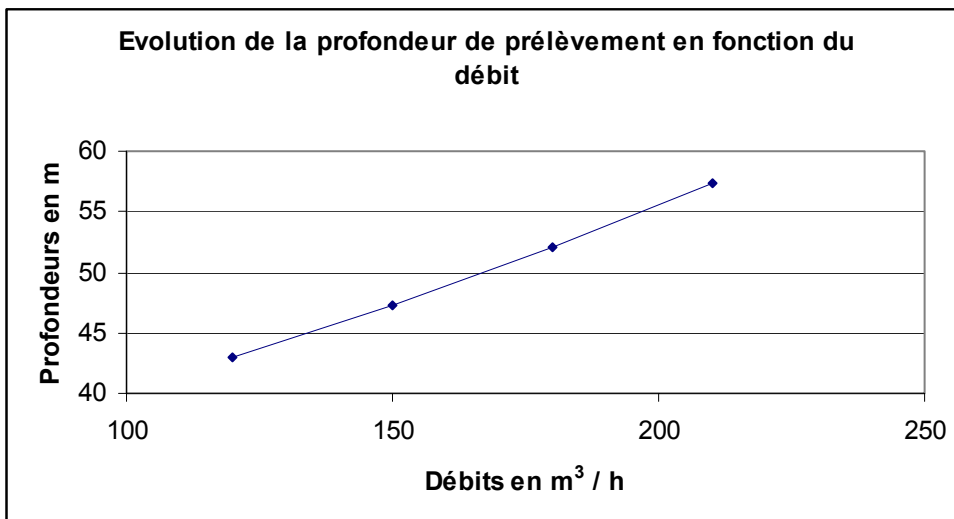


Figure 2- 23 - Essai de pompage dans la région de Darb El Arbain. Profondeurs, stabilisées après 25 heures de pompage, en fonction du débit (REGWA, 1999)



- les nappes captives qui sont en grande partie recouvertes d'une couche de sous-sol de faible perméabilité. Elles sont alimentées par des surfaces relativement restreintes où la perméabilité de la couche supérieure le permet. Les nappes captives sont généralement profondes de plusieurs centaines de mètres. Lorsque les surfaces d'alimentation de la nappe se situent en altitude, elle peut être sous pression. Dans le cas de certains forages, la pression disponible dans les nappes est alors suffisante pour que l'eau remonte jusqu'au niveau du sol : on parle de forages artésiens.

De même que pour les cours d'eau, les nappes souterraines peuvent présenter une saisonnalité avec une disponibilité plus réduite pendant la période sèche. Cependant le sous-sol constitue une réserve naturelle qui atténue les variations saisonnières de la disponibilité de la ressource. Au niveau des nappes libres, ces variations se traduisent le plus souvent par des variations de la hauteur piézométrique de la nappe.

Les nappes captives sont très peu sensibles aux variations saisonnières de la pluviométrie. En effet, le stock des nappes captives est souvent constitué sur plusieurs centaines voire plusieurs milliers d'années et les quantités d'eau que représente une année d'alimentation apparaissent négligeables par rapport au volume stocké.

Du point de vue de l'accessibilité, les ressources souterraines sont différentes des ressources de surface par le fait que leur distribution est surfacique ce qui réduit les besoins de transport. Lorsque qu'une nappe souterraine est présente sous un site, la principale contrainte en termes d'accessibilité est la profondeur. La profondeur de la nappe a une influence sur le type d'ouvrage à réaliser pour capter l'eau (puits, forage) mais surtout sur le coût en énergie de l'opération de prélèvement. En outre, il convient de noter que le niveau et/ou la pression de la nappe baisse localement pendant le pompage (Figure 2- 23). Le niveau dans le puits pendant le pompage est appelé niveau dynamique de la nappe. Le comportement de la nappe pendant le pompage dépend de la porosité et de la conductivité hydraulique du milieu dans lequel est stocké l'eau.

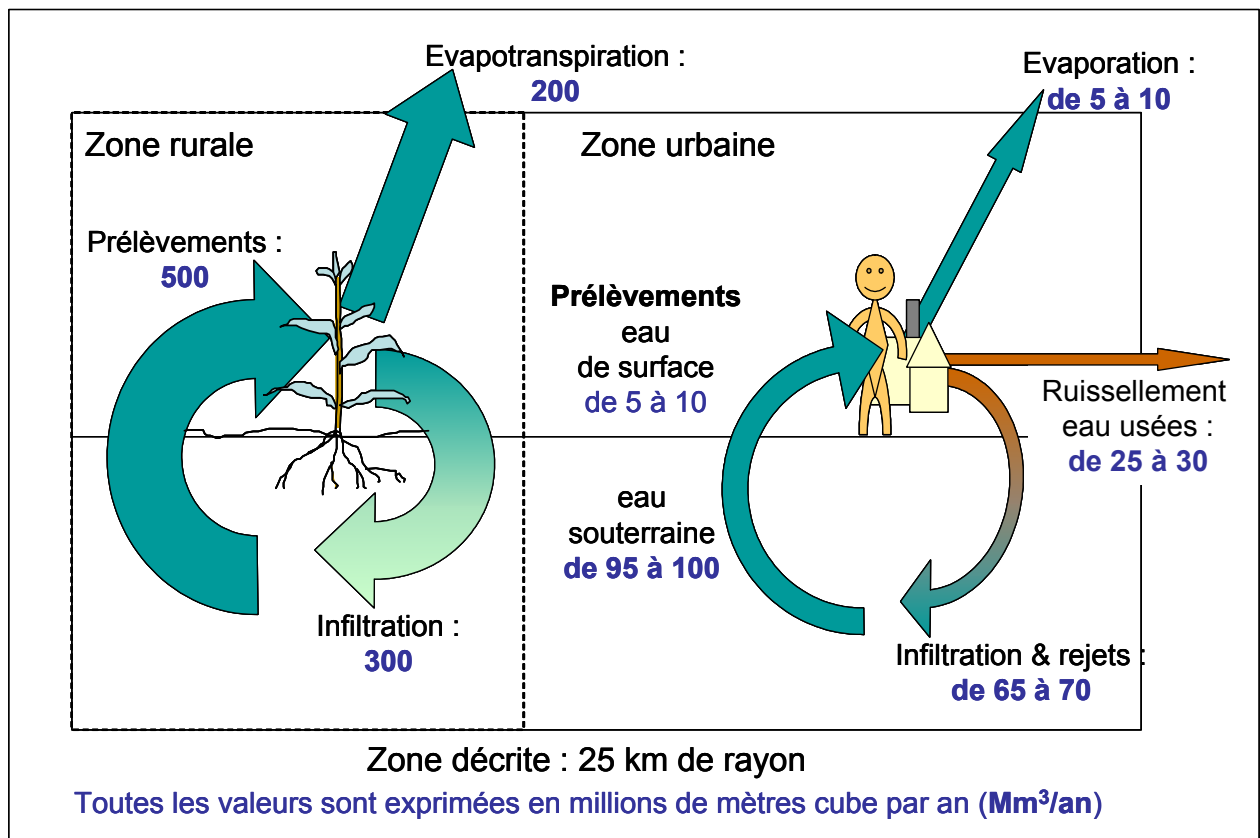
Enfin, le volume d'eau que l'on peut prélever dans la ressource est plus difficile à estimer dans le cas des ressources souterraines. Il faut en effet réaliser un bilan hydrique complet sur un milieu que l'on ne peut observer directement. Pour cela il convient d'évaluer les flux intrants et les flux sortants ainsi que le bilan des échanges avec les cours d'eau et les autres nappes. Les flux intrants sont constitués par la part des précipitations qui s'infilte dans le sous-sol et par la part des volumes d'eau prélevés qui sont réinjectés dans la nappe. Les flux sortants sont l'ensemble des prélèvements dédiés aux activités humaines. Le bilan des échanges avec les autres ressources en eau peut être positif ou négatif. Dans les échanges entre les nappes libres et les nappes captives, il peut exister une saisonnalité avec un bilan positif pendant la période de crue et un bilan négatif pendant la période d'étiage.

Autres ressources en eau

Il ne faut pas perdre de vue que d'autres ressources en eau peuvent être mobilisées pour l'agriculture irriguée. On retiendra notamment :

- la collecte d'eau de pluie (Oweis, 1999),
- les eaux de crues,
- la maîtrise de l'utilisation de l'eau (Haddad, 2001),
- la valorisation des eaux usées,
- le dessalement, peu adapté à l'irrigation.

Figure 2- 24 – Influence des activités humaines sur le cycle de l'eau dans la zone urbaine et périurbaine (rurale) de la ville de Jaïpur (Goossens et Bonnet, 2003a)



On notera également que, dans certaines situations, les importations en denrées agricoles dont la production demande des quantités d'eau importantes peuvent constituer l'équivalent d'une ressource en eau à l'échelle d'un pays. Le terme d'eau virtuelle est souvent utilisé pour définir l'eau nécessaire à la production des denrées alimentaires importées.

Figure 3- 1 – Diagramme fonctionnel de l’approvisionnement alimentaire avec détail sur la production agricole et l’irrigation

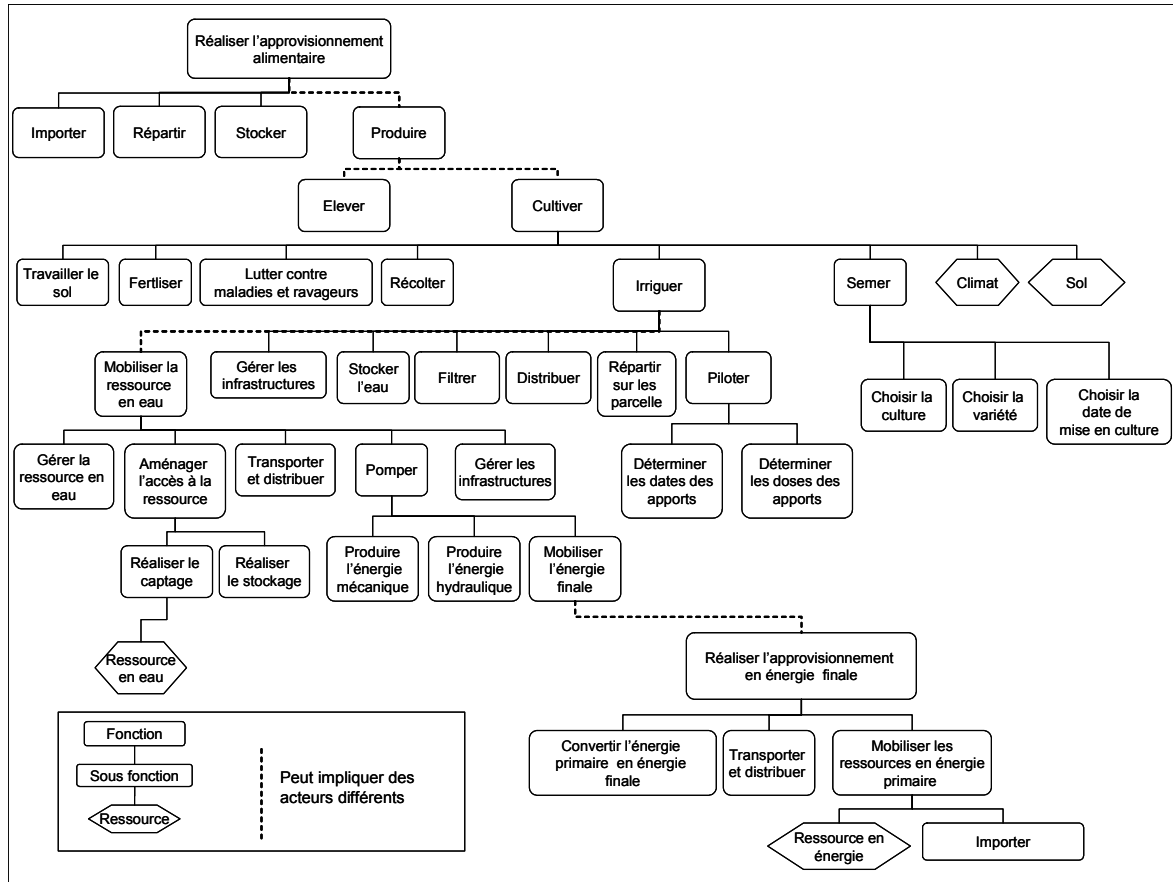
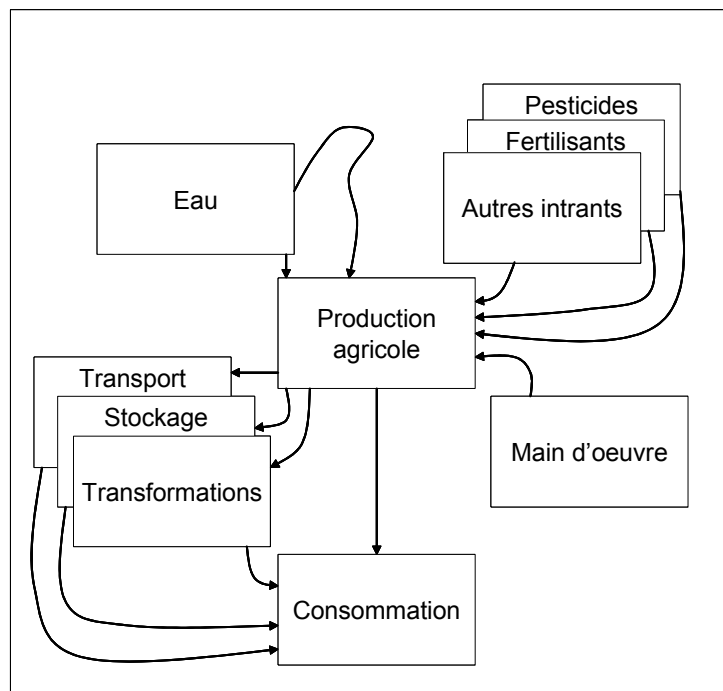


Figure 3- 2 – Les flux de l’approvisionnement alimentaire et de la production agricole



3 Fonctions de l'alimentation et de l'agriculture irriguée

Ce chapitre a pour objectif de décrire les fonctions mises en œuvre pour satisfaire les besoins des hommes en termes d'approvisionnement alimentaire et de production agricole irriguée. On définit comme fonction **toute opération** mise en œuvre par l'homme qui a pour effet de déplacer, de stocker, de transformer un flux primaire par la mobilisation d'infrastructures, de pratiques et de flux secondaires.

En outre, lorsque l'on cherche à améliorer les performances de telle ou telle fonction, il peut s'avérer nécessaire de la décrire en détail et, dans certains cas, de la **décomposer en sous-fonctions**. Cette démarche de décomposition est utile à chaque fois que l'on se demande comment parvenir pratiquement à tel ou tel résultat technique. En revanche, si l'on s'interroge sur l'apport de l'amélioration de la performance technique d'une fonction, il convient de déterminer l'apport de la fonction étudiée dans un processus plus global.

Dans ce sens, la fonction de base du système que l'on se propose d'étudier est la fonction « nourrir les hommes ». Ce choix peut être contesté si l'on considère que la production agricole peut s'adresser à d'autres secteurs que celui de l'alimentation. Ce sont notamment les secteurs du textile (coton, lin), des bioénergies (huiles végétales et éthanol) et des industries pharmaceutiques. Cependant les flux en jeu pour ces autres usages de la production agricole sont beaucoup moins significatifs que ceux mobilisés par l'usage alimentaire. De plus, pour toutes ces utilisations de la production agricole, d'autres sources de matières premières peuvent être envisagées alors que la production agricole est, de loin, la principale activité permettant de satisfaire les besoins de l'alimentation humaine.

La décomposition en sous-fonctions de l'approvisionnement alimentaire nous permet, enfin, de situer le rôle de la production végétale, et celui de l'irrigation.

3.1 Nourrir les hommes

Les fonctions de l'approvisionnement alimentaire garantissent l'accès des populations aux denrées alimentaires. On distingue deux sous-fonctions d'acquisition, la production et l'importation, et deux sous-fonctions de répartition, le stockage et la distribution.

3.1.1 Production végétale

Comme nous l'avons vu plus haut, dans la production végétale, ce sont les cultures qui assurent la transformation du dioxyde de carbone de l'air et des éléments minéraux du sol en molécules plus complexes en utilisant comme source d'énergie le rayonnement solaire. Chaque espèce végétale comestible peut être caractérisée par un potentiel de production en énergie, protéines et vitamines.

Les grandes cultures à fort contenu énergétique sont les céréales, les légumineuses et, dans une moindre mesure, les racines et tubercules avec des contenus énergétiques par unité de masse produite variant de 800 kcal/kg pour les racines et tubercules à 2800 à 3500 kcal/kg pour les céréales et les légumineuses.

Les légumineuses (environ 200 g/kg) et dans une moindre mesure les céréales (environ 70 g/kg) présentent également des contenus en protéines intéressants alors que ce n'est pas le cas des racines et tubercules.

Tableau 3-1 – Valeurs indicatives du contenu en énergie (kcal kg⁻¹) et en protéines (g kg⁻¹) de quelques produits d'origine végétale et animale. Ces valeurs sont des moyennes arrondies portant sur plusieurs pays (France, Maroc, Inde) et établies sur la base des apports et des consommations par habitant (FAOSTAT, 2004)

(kg ⁻¹)	Céréales		Légumineuses		Fruits et légumes		Racines et tubercules		Viandes		Prod. animale						
	kcal	g prot.	kcal	g prot.	kcal	g prot.	kcal	g prot.	kcal	g prot.	kcal	g prot.					
Orge	2400	70	Haricots secs	3450	210	Pommes	460	3	P. de T.	680	16	Bœuf	1448	141	Fromage	3450	220
Maïs	2750	69	Poids	3300	230	Bananes	620	7	Manioc	1020	7	Porc	3213	108	Œufs	1334	111
Riz (Paddy)	2500	53	Soja	3470	370	Oignons	390	14				Poulet	1384	126	Lait	507	34
Sorgo	2200	90				Oranges	270	4				Mouton	1957	139	Beurre	7567	3
Blé	2900	88				Tomates	190	8				Abats	1075	178	Poisson	648	101

Tableau 3-2 – Valeurs indicatives du rendement, de la production énergétique et de la production de protéines de 13 cultures. Les moyennes de rendements sont établies pour les pays producteurs en 2002 (FAOSTAT, 2004)

	Légumineuses		Racines et tubercules		Céréales			Fruits et légumes					
	Haricots secs	Poids sec	P. de T.	Manioc	Maïs	Blé	Riz	Pommes	Bananes	Dattes	Oignons	Oranges	Tomates
Rendements en kg. ha⁻¹													
Min.	228	268	2000	1733	119	300	750	1700	1100	1300	2400	485	1400
Moy.	1258	1671	16964	9652	3429	2955	3502	13263	14488	6937	16870	11060	33732
Max.	3770	4600	46600	21000	12500	8800	9500	56000	52000	36000	43000	34800	262000
Contenu énergétique kcal. kg⁻¹													
Moy.	3450	3300	680	1020	2750	2900	2500	416	627	1597	375	280	186
Production d'énergie GJ. ha⁻¹													
Min.	3,3	3,7	5,7	7,4	1,4	3,6	7,8	3,0	2,9	8,7	3,8	0,6	1,1
Moy.	18,1	23,0	48,2	41,2	39,4	35,8	36,6	23,1	38,0	46,3	26,4	12,9	26,2
Max.	54,4	63,5	132,5	89,5	143,7	106,7	99,3	97,3	136,4	240,3	67,4	40,7	203,7
Contenu en protéines g. kg⁻¹													
Moy.	210	230	16	7	69	88	53	2,5	8,7	17	13	5,1	9,8
Production de protéines kg. ha⁻¹													
Min.	48	62	32	12	8	26	40	4	10	22	31	2	14
Moy.	264	384	271	68	237	260	186	33	126	118	219	56	331
Max.	792	1058	746	147	863	774	504	140	452	612	559	177	2568

Encadré 3-1 – Du contenu en azote des aliments à leur contenu en protéines

Les méthodes actuelles d'évaluation du contenu protéique des aliments se basent sur un **dosage de l'azote**. Cependant, il existe deux biais importants à cette méthode. Premièrement, tous les atomes d'azote d'un dosage ne sont pas nécessairement issus des protéines. Et deuxièmement, les acides aminés peuvent contenir un, deux ou trois atomes d'azote. En attendant des méthodes standard d'évaluation du contenu en acides aminés des aliments, la FAO (2003) recommande d'utiliser un **facteur de correction** propre à chaque aliment afin de déterminer la masse de protéines présentes dans l'aliment considéré à partir de la masse d'azote mesurée.

Tableau 3-3 – Facteur conversion du contenu en azote des aliments en contenu protéique (facteurs de Jones) (FAO, 2003)

Produits d'origine animale		Produits d'origine végétale	
Œufs	6,25	Maïs	6,25
Viande	6,25	Blé	5,83
Lait	6,25	Soja	5,71
		Haricots rouges	6,25

Concernant les vitamines, il apparaît plus délicat de quantifier les apports respectifs de chaque catégorie de cultures. On remarque cependant l'importance des légumes frais et des fruits pour l'apport en vitamines C, en folates et acides foliques. En outre, la FAO et l'OMS (2001) soulignent l'existence de trois stratégies pour lutter contre les carences en micro nutriments : (i) la supplémentation consiste à administrer directement les nutriments concentrés dans des pilules ou des sirops, (ii) l'enrichissement de certains aliments clés en vitamines ou en minéraux (iode dans le sel, phénylalanine dans la farine, vitamine C dans les jus de fruits, ...), (ii bis) le bio enrichissement de produits végétaux par la sélection de variétés qui présentent de meilleurs résultats nutritionnels, (iii) la diversification de l'alimentation en favorisant les aliments locaux et acceptés culturellement.

Le Tableau 3-1 et le Tableau 3-2 donnent quelques valeurs indicatives du contenu en protéines des principaux groupes d'aliments et de rendements en énergie et en protéines par hectare. On retiendra également que les rendements moyens des différentes cultures peuvent être relativement variables en termes de production de protéines (de 30 à 350 kg/ha), mais qu'ils restent du même ordre de grandeur pour la production d'énergie alimentaire (de 12 à 50 GJ/ha). En revanche, lorsque l'on s'intéresse aux écarts entre les rendements maximum et minimum observés pour différents pays on observe une variabilité qui peut facilement atteindre deux ordres de grandeur sur la production d'énergie comme sur celle de protéines. Cette observation appelle une analyse plus détaillée de la fonction de production que l'on se propose de développer dans le paragraphe 3.2.

A ce niveau, nous retiendrons que le choix des cultures peut largement contribuer à la recherche d'un bon équilibre entre les productions d'énergie alimentaire, de protéines d'origine végétale et de vitamines.

3.1.2 Production animale

Du point de vue énergétique, la production animale diffère de la production végétale par le fait qu'elle se situe un rang plus haut dans la chaîne trophique. Il en résulte que la quantité d'énergie solaire nécessaire pour produire un GJ d'énergie alimentaire ou une masse de protéines d'origine animale est environ 20 fois plus élevée que celle nécessaire à la production des mêmes quantités par les végétaux (Bonnet, 1998).

Les produits alimentaires d'origine animale se caractérisent par leur contenu élevé en protéines de qualité et en vitamines, A et D notamment. Par protéines de qualité, on entend que les protéines d'origine animale présentent un contenu sensiblement plus élevé en acides aminés essentiels que les protéines végétales.

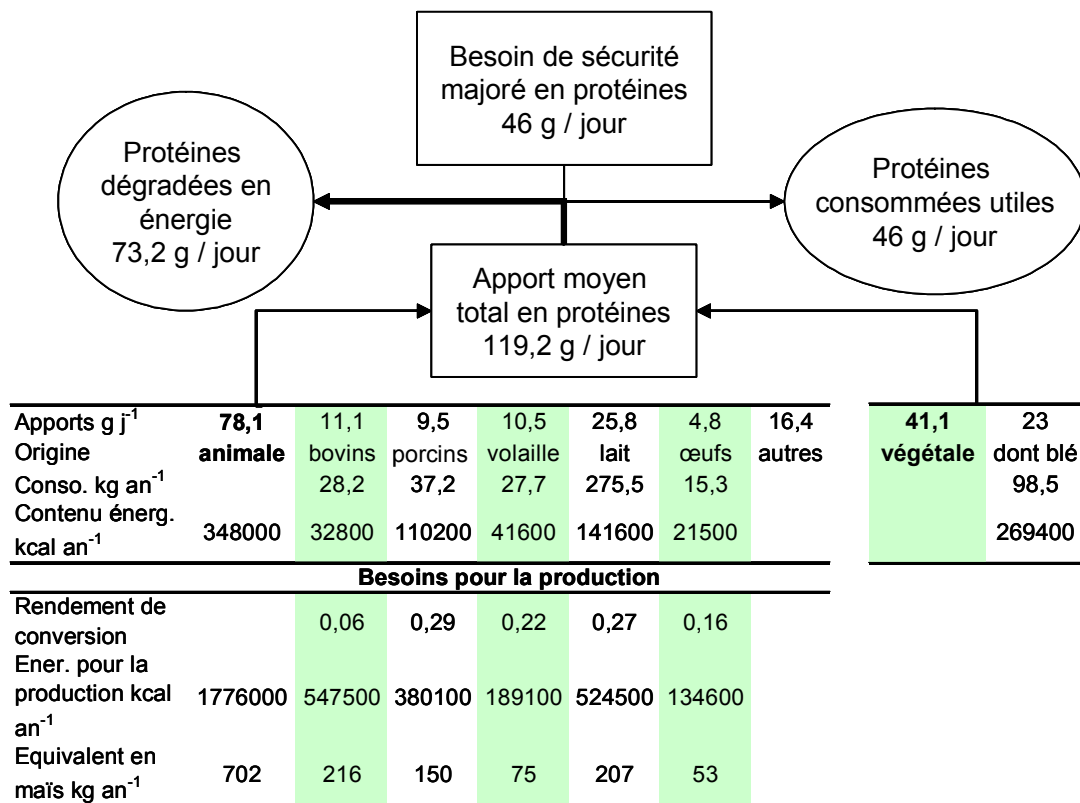
Il convient cependant de rappeler que lorsque les apports en protéines sont supérieurs aux besoins du corps humain, les protéines en surabondance sont recyclées en énergie. Toujours du point de vue énergétique, un apport en protéines très supérieur aux besoins du corps correspond alors à une perte de rendement significatif dans la chaîne alimentaire. Cet aspect est détaillé pour le cas de la France dans l'Encadré 3-2. De même, du point de vue de la demande en eau, une alimentation à fort contenu en protéines implique la mobilisation et la consommation de quantités d'eau très importantes (Tableau 3-4).

Dans son travail sur les apports solaires implicites dans les activités humaines, Bonnet (1998) réalise une étude des rendements et des flux énergétiques de la production animale suivant différentes filières. Il est à noter que les pâturages contribuent pour environ 4/5 à l'apport en énergie d'origine végétale de la production animale.

Encadré 3-2 - Apports moyens en protéines par origine et par habitant et implication en termes de besoin en alimentation animale (France – 2002)

Sources : consommation par habitant, contenu en énergie et en protéines des aliments (FAOSTAT), rendements énergétiques de conversion de la production animale (Bonnet, 1998), conversion en équivalent maïs (2530 kcal/kg).

Le besoin de sécurité moyen en protéines est calculé sur la base d'un besoin de 0,75 g j⁻¹ kg⁻¹ de poids corporel, soit un besoin moyen de sécurité de 46 g j⁻¹ hab⁻¹ (sans tenir compte du fait que les besoins pour les enfants sont globalement plus faibles du fait de leur poids corporel inférieur à celui des adultes).



Dans l'alimentation moyenne en France, 73,2 g de protéines ne sont pas directement utiles au bon fonctionnement du corps et sont dégradés en énergie. Si on considère que les 46 g/j de protéines effectivement utiles sont exclusivement d'origine animale (ce qui n'est vraisemblablement pas le cas), il reste 32 g/j de protéines animales qui sont dégradées en énergie.

On remarque par ailleurs que l'énergie contenue dans les aliments nécessaires à la production animale pour la consommation annuelle d'un français moyen est considérable. **Cette énergie pour nourrir les animaux correspond à plus de 450 jours de disponibilité énergétique alimentaire moyenne par habitant et à l'équivalent de plus de 700 kg de maïs.**

En outre, **la production des 32 g/j de protéines animales non valorisées** en tant que telles par l'organisme et dégradées en énergie (128 kcal/j) a nécessité 1996 kcal/j d'aliments soit l'équivalent de 55 % de la DEA quotidienne en France.

3.1.3 Importation des denrées alimentaires

L'importation alimentaire revient pour un pays à accéder indirectement à des ressources qui ne sont pas disponibles ou difficilement mobilisables du point de vue physique ou économique. Ainsi chaque tonne de denrée alimentaire importée au sein d'un pays a un contenu équivalent en eau, en énergie et en heures de travail.

Du point de vue du pays importateur, les importations représentent d'abord des coûts évités en eau, éventuellement en énergie (le coût énergétique de l'importation peut dépasser celui de la production), et en heures de travail (dans les pays où l'économie est forte, le coût du travail est tel que seules les solutions de production agricole intensive permettent de rentabiliser les ressources humaines mobilisées). L'importation permet également d'accéder à des productions spécifiques (café, cacao, fruits exotiques) à certains climats ou de répartir sur toute l'année l'approvisionnement en certains produits frais.

Concernant le « contenu équivalent » en eau des denrées, du point de vue du pays importateur, c'est bien le coût en eau évité dans les conditions nationales qu'il faut considérer et non le coût en eau de la production dans le pays d'origine. L'Encadré 3-3 donne quelques éléments pour l'évaluation des équivalences entre importations et « contenus en eau ».

Par ailleurs, on remarque que l'accès au marché international n'est possible pour un pays que si son économie le permet. En d'autres termes, un pays ne peut baser une part significative de son approvisionnement alimentaire sur l'importation que s'il est capable de générer par ailleurs des revenus suffisants et si ces revenus sont équitablement répartis sur l'ensemble des consommateurs. Cela implique que le pays importateur soit par ailleurs exportateur de quantités significatives de biens et/ou de services (y compris l'accueil de touristes). Il en résulte, à l'évidence, que l'importation n'apporte pas de solutions au problème d'approvisionnement alimentaire des pays pauvres.

Enfin on remarque que l'accès d'un pays au marché international peut, dans certains cas, constituer un frein au développement de l'agriculture. Cela s'explique partiellement par le fait qu'il faut plusieurs années pour que les progrès de développement de la production agricole soient perceptibles en termes de rendement. Pendant cette période d'amélioration de la production, le marché des productions locales et la viabilité économique de ces productions et des investissements réalisés restent extrêmement vulnérables aux prix du marché international.

Du point de vue du pays exportateur, la mise à disposition sur le marché international d'une production nationale revient à exporter indirectement des ressources relativement abondantes mais également une capacité à mobiliser ces ressources et le travail correspondant. Une partie des choix en matière d'exportation peut ainsi être définie en considérant, d'une part, les ressources naturelles disponibles et, d'autre part, le niveau de rémunération recherchée pour les agriculteurs et les autres acteurs de la filière considérée.

En outre, dans la mesure où l'export doit permettre une rémunération des ressources humaines mobilisées adaptée aux niveaux de vie du pays, les choix de politique agricole et environnementale, concernant notamment le niveau et les modalités d'attribution des subventions, jouent un rôle important dans la faisabilité économique d'une activité productive dédiée à l'export.

Encadré 3-3 - Les équivalences en eau pour les importations

La FAO donne des valeurs de correspondance des besoins en eau moyens pour les différentes productions agricoles. Ces valeurs peuvent être utilisées en première approximation pour déterminer les consommations d'eau évitées par l'importation. Cependant il convient de noter que ces besoins en eau sont assez variables d'un contexte national à un autre.

Tableau 3-4 – Valeurs moyennes du contenu en eau des produits agricoles (FAO, 2003 a).

	Eau nécessaire pour la production [m ³ kg ⁻¹]
Viande de bœuf	15
Viande de mouton	10
Viande de volaille	6
Céréales	1,5
Légumineuses, racines et tubercules	1
Agrumes	1
Huile de palme	2

En fait pour établir les équivalences en eau des produits importés, il semble plus judicieux de considérer les besoins effectifs en eau pour une production équivalente sur le territoire importateur. En outre il convient également de distinguer les besoins en eau totale de la production et les besoins en eau d'irrigation. Pour illustrer ces considérations on peut comparer trois zones de production de blé : Egypte, Inde et France par exemple. En prenant en compte d'une part la demande climatique et d'autre part les rendements moyens des pays considérés, on obtient les résultats ci-dessous. En France, la majorité des apports est d'origine pluviale et sur la saison un seul apport peut suffire ce qui n'est évidemment pas le cas ni en Egypte, ni en Inde.

Tableau 3-5 – Estimation des besoins en eau d'irrigation (consommation seulement) par unité de masse produite pour trois pays.

		Egypte	Inde	France
Besoins en eau d'irrigation par hectare	m ³ ha ⁻¹	3000	3000	200
Rendements	kg ha ⁻¹	6700	2700	7500
Besoins en eau par kg	m ³ kg ⁻¹	0,45	1,11	0,03

Encadré 3-4 – Exportations, importations : le cas du Niger

Lorsque un pays est pauvre, même si ces exportations sont significatives, cela ne lui permet pas systématiquement d'accéder aux importations dans des quantités suffisantes pour garantir une DEA à l'échelle nationale. C'est notamment le cas du Niger dont, d'une part, les ressources en eau ne permettent pas d'envisager une politique d'irrigation ambitieuse (cf Annexe fiche Niger) et dont, d'autre part le niveau économique est insuffisant pour importer les denrées nécessaires à la satisfaction de ses besoins alimentaires.

Ce pays représente pourtant l'un des principaux sites mondiaux de la production d'uranium. Chaque année plus de 3000 tonnes d'uranium extraites au Niger sont exportées vers la France, ce qui permet à la France de produire environ 40% de son électricité. Le poids de cet uranium dans l'économie française est considérable. Cependant, compte tenu du cours du minerai et des modalités d'exploitation par les sociétés françaises, l'impact financier à l'échelle du Niger reste faible.

Du point de vue global, les échanges entre pays peuvent être considérés sous l'angle de l'amélioration de la sécurité alimentaire et sous l'angle du coût énergétique global de telle ou telle combinaison de solutions d'approvisionnement. En fait, ni le niveau d'approvisionnement alimentaire minimum des populations ni l'optimisation énergétique ne sont des objectifs réellement recherchés dans la pratique. Les échanges sont davantage décidés sur la base de critères économiques, politiques ou stratégiques. Il en résulte qu'une démarche d'optimisation énergétique visant à établir des arbitrages entre différentes solutions d'approvisionnement semble peu pertinente.

Toutefois, on peut tenter de poser, dans leurs grandes lignes, **les bases d'une optimisation énergétique de l'approvisionnement** à l'échelle internationale. Il s'agirait premièrement de définir les potentiels de production des différentes zones agricoles par pays ou par territoire en tenant compte des disponibilités locales en termes de ressources naturelles, d'infrastructure en place ou à développer, et de la technicité des acteurs. Il conviendrait ensuite d'évaluer les coûts énergétiques pour chaque territoire et pour les différentes options de production envisagées. Parallèlement, les coûts énergétiques impliqués par les échanges devraient être pris en compte en considérant notamment, d'une part, les distributions spatiales de l'offre et de la demande en tenant compte de la disponibilité des axes de transport et, d'autre part, de l'intensité énergétique des différents modes de transport. La démarche consisterait ensuite à proposer et à évaluer différentes options de production et d'échange en vue de garantir un approvisionnement alimentaire satisfaisant tout en minimisant les coûts énergétiques et environnementaux.

3.1.4 Collecte, transport et distribution de la production agricole

Il s'agit d'acheminer la production agricole depuis les exploitations agricoles jusqu'aux zones de consommation. Nous avons vu précédemment que les contraintes pour ce faire peuvent s'exprimer en termes de distance à parcourir et de quantité de déplacements à mettre en œuvre. Plusieurs modes de transport peuvent être mobilisés : transport routier de faible et de fort tonnages, transport ferroviaire et transport maritime.

On définit par intensité énergétique d'un mode de transport la quantité d'énergie nécessaire pour déplacer une tonne de marchandise sur une distance d'un kilomètre. Le Tableau 3-6 donne les valeurs de l'intensité énergétique des trois principaux modes de transport utilisés pour la production agricole. Ces valeurs synthétiques évaluées par Schipper et al. (1996) et Lenzen (1999) intègrent de nombreux paramètres comme les détours occasionnés par le tracé des routes pour se rendre d'un lieu à un autre ou le fonctionnement à vide des transporteurs. On propose d'utiliser ces valeurs pour l'évaluation de la demande en énergie de la partie transport. En revanche, concernant la collecte et la répartition de la production agricole, il peut être utile d'affiner l'approche afin de mettre en évidence des paramètres d'optimisation énergétique. En effet, nous avons vu au § 2.1.2 que la structure des réseaux et des points de collecte peut avoir une influence significative sur la distance totale à parcourir et sur les besoins en termes de transport en tonne-kilomètre.

L'utilisation des intensités énergétiques intégrées présentées ne permet pas de tenir compte de cet aspect. Pour ce faire, il faut remonter aux consommations des véhicules de transport pour les distances effectivement parcourues en charge et à vide. Il convient également de tenir compte de la charge utile des véhicules afin de déterminer le nombre de voyages à faire pour chaque point de collecte.

Encadré 3-5 - Le coût énergétique du transport pour l'importation du blé en Egypte

En Egypte, le blé contribue pour environ 33 % à la ration énergétique alimentaire moyenne. Avec 5,6 Mt/an de blé, les importations représentent plus de 47 % de l'approvisionnement national. Afin d'évaluer le coût en énergie des importations, on propose de prendre en compte les distances de transport terrestre et maritime, en faisant la distinction entre le transport routier et le transport par train. L'hypothèse est faite que la répartition entre transport par train et par route du blé correspond aux moyennes nationales du fret.

Tableau 3-6 – Evaluation du coût en énergie de l'importation du blé en Egypte en fonction des provenances

		Distance de transport terrestre dans le pays d'origine (km)	Part du transport routier (%)	Part du transport par train (%)	Distance de transport maritime (km)	Intensité énergétique par mode de transport MJ / tkm			Coût énergétique pour le transport d'une tonne de blé rendue en Egypte			
						Route	Train	Mer	terrestre	maritime	total	total
									MJ / t	MJ / t	MJ / t	tep / t
Etats-Unis	1	2200	51	49	9300	3,27	0,29	0,29	3982	2697	6679	0,16
EU (15)	1	800	77	23	2700	3,11	0,29	0,41	1969	1107	3076	0,07
Australie	2	500	64	36	15200	2,34	0,9	0,3	911	4560	5471	0,13
Russie	3	1000	50	50	2500	3,11	0,29	0,3	1700	750	2450	0,06
Autres	3	800	50	50	2700	3,11	0,29	0,3	1360	810	2170	0,05

1 répartition du transport de fret terrestre et intensités énergétiques d'après Schipper et al. (1996)

2 répartition du transport de fret terrestre et intensités énergétiques d'après Lenzen (1999)

3 répartition du transport de fret terrestre et intensités énergétiques (estimations)

En 2002, la répartition des sources d'approvisionnement en blé de l'Egypte s'est considérablement modifiée. La part des **importations en provenance des Etats-Unis a été divisée par 3** au profit de l'Union Européenne et de la Russie principalement. Cette évolution a des implications en termes d'efficacité énergétique de l'approvisionnement alimentaire de l'Egypte. On peut estimer qu'entre l'année 2001 et l'année 2002 la **consommation d'énergie pour le transport du blé** à destination de l'Egypte **a diminué d'environ 30 %** soit une économie d'environ 0,25 Mtep (soit 0,5% de la consommation d'énergie primaire du pays).

Figure 3- 3 – Répartition des importations de blé en Egypte pour la période 1995 – 2002 (FAOSTAT)

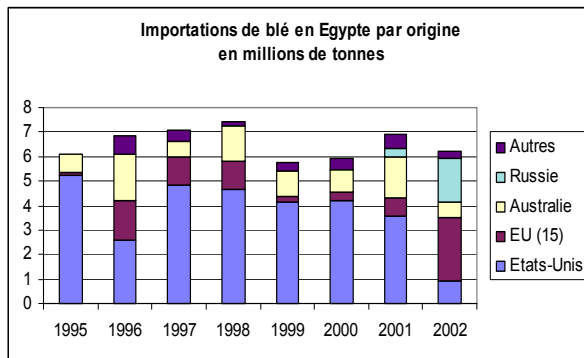
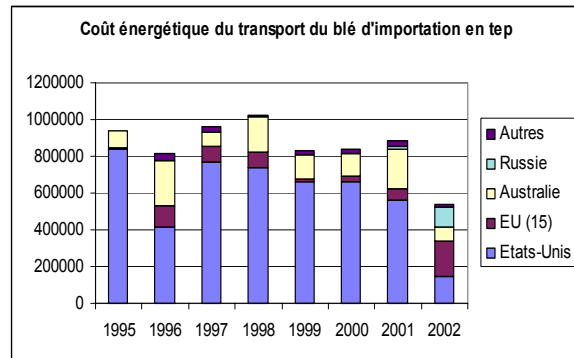


Figure 3- 4 - Consommation d'énergie pour les importations de blé en fonction de leurs provenances pour la période 1995 – 2002



Au cours de la même période le prix du pétrole à l'échelle mondiale est passé de 17 (1995) à 25 \$ / baril (2002). Le coût moyen de l'énergie pour le transport du blé est passé de 19 à 22 \$ par tonne de blé importé entre 1992 et 2001 pour se réduire à 15 \$ / tonne de blé importé en Egypte en 2002.

Un calcul simple peut être envisagé pour se faire une idée du coût énergétique du transport pour l'importation de denrées alimentaires par un pays. Pour cela, on utilise les volumes d'importation du pays concerné par provenance (FAOSTAT), on évalue les distances terrestres et maritimes parcourues que l'on multiplie par les valeurs de l'intensité énergétique des différents modes de transport. L'Encadré 3-5 présente une application de ce calcul d'évaluation du coût en énergie du transport terrestre et maritime pour l'importation du blé en Egypte. On remarque dans cette illustration que la répartition des provenances a une influence significative dans le coût énergétique de l'importation du blé. Du point de vue économique, ces coûts de transport doivent être pris en compte avec une attention croissante. En effet on observe, à court terme, entre 2002 et 2005, que le cours du pétrole est passé de 25 à plus de 50 \$ / baril (tendance qui devrait se maintenir à moyen terme).

3.2 Produire les végétaux

La production des végétaux passe par un certain nombre de sous-fonctions, de la mise en culture à la récolte. Afin de ne pas perdre de vue que l'activité agricole ne se limite pas à l'irrigation, on rappelle ci-dessous ses principales sous-fonctions :

- préparer le sol, labourer, ...
- semer et/ou planter,
- fertiliser (azote, potassium, phosphore),
- irriguer,
- récolter.

Suivant le niveau d'intensification de la production agricole, les flux fonctionnels mobilisés pour la réalisation de ces sous-fonctions varient considérablement. Du point de vue énergétique, on distingue quatre types d'intrants que sont :

- l'énergie pour l'alimentation des actifs agricoles, d'une part, et les animaux utilisés comme force de travail, d'autre part,
- l'énergie commerciale utilisée pour les travaux dans les champs,
- l'énergie contenue dans les fertilisants,
- l'énergie contenue dans le matériel et dans certaines infrastructures.

On pourrait estimer l'énergie alimentaire nécessaire aux actifs agricoles en réalisant le produit du nombre d'actifs agricoles par le besoin énergétique alimentaire quotidien d'un adulte d'activité physique intense (3000 à 3500 kcal j⁻¹ hab⁻¹). En se basant sur les rendements moyens obtenus, d'une part, et sur la surface cultivée, d'autre part, on peut évaluer la consommation d'énergie alimentaire par hectare exploité, et par tonne de production agricole.

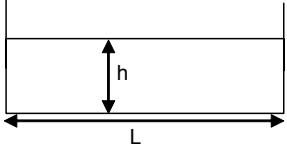
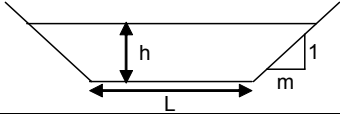
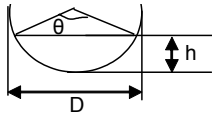
Dans une approche plus détaillée, Pimentel et Pimentel (1979) évaluent le coût énergétique des principales sous-fonctions de la production agricole opérées par différents moyens. Le labour d'un hectare de terre nécessite ainsi 0,83 GJ et 400 heures de travail d'un homme, 1,2 GJ et 65 heures de travail d'un homme et d'une paire de bœufs, et 1,3 GJ et 4 h de travail avec un tracteur de 50 chevaux. Dans ce dernier cas, le coût énergétique pour fabriquer le matériel doit également être pris en compte. Il est estimé à environ 1 GJ toujours pour le labour d'un hectare (sans détail sur les modalités d'amortissement).

Concernant les coûts énergétiques de la production des engrais, ils varient pour l'« azote » de 28 à 46 GJ / t NH₃ suivant les procédés utilisés (Rafiqul et al., 2005). Pour le phosphate (P) et le potassium (K) les quantités d'énergie nécessaires à la production varient de 1,6 à 9 GJ / t de P et sont d'environ 4,6 GJ / t de K (Pimentel et Pimentel, 1979). Les besoins en fertilisants varient en fonction du type de culture, de la composition du sol, et des résultats de production recherchés.

Tableau 3-7 – Valeurs types du coefficient de Manning pour différents types de parois (Lencastre, 1996)

Description du type de revêtement	n
Parois très lisses :	
Mortier très lisse de ciment et sable, planches rabotées, tôles métalliques sans soudures saillantes	0,01 à 0,012
Parois lisses :	
Planches avec joints mal soignés, enduits ordinaires, grès	0,0125
Canaux en béton lisse avec de nombreux joints	0,0134
Maçonnerie ordinaire, terre très régulière	0,0142
Parois rugueuses :	
Terre irrégulière, béton rugueux ou dégradé, maçonnerie vétuste ou mal soignée	0,0167
Parois très rugueuses :	
Terre très irrégulière avec des herbes, rivières régulières en lit rocheux	0,02
Terre en mauvais état, rivière en lit de cailloux	0,025
Terre complètement à l'abandon, torrents transportant de gros blocs	0,05 à 0,0667

Figure 3- 5 - Evaluation du débit pour quelques configurations de canaux types rencontrées dans les réseaux collectifs du Gharb ; pour tous les canaux, la pente est prise égale à 0,1% (d'après Lencastre, 1996)

Géométrie de la section	Périmètre mouillé	Aire de la section	R= A / P	Débit en m ³ s ⁻¹
	$P = 2 h + L$ Application numérique : h=0,2 m et L = 0,4 m P= 0,8 m	$A = h L$ Application numérique : A=0,08 m ²	0,1	0,027
	$P = 2 h (1 + m^2)^{1/2} + L$ Application numérique : h=1,5 m, L = 2 m et m = 0,8 P=5,84 m	$A = h L + h^2 m$ Application numérique : A= 4,8 m ²	0,82	9,9
	$P = D \theta / 2$ Application numérique : h=0,3 m et D = 0,7 m P= 1 m	$A = D^2 (\theta - 2 \sin(\theta/2)\cos(\theta/2)) / 8$ $\theta = 2 \arccos(1 - 2 h / D)$ Application numérique : $\theta=2,85$ m et A = 0,158 m ²	0,16	0,11

3.3 Mobiliser les ressources en eau et irriguer

La fonction principale de l'irrigation consiste à répartir, dans le temps et l'espace, l'eau disponible afin de satisfaire les besoins en eau des cultures. De la ressource à la plante, on peut distinguer cinq types d'opérations appliquées à l'eau :

- captage (ou prélèvement),
- transport et distribution,
- stockage,
- répartition sur la parcelle,
- pompage.

A ces opérations physiques on rajoute une fonction de gestion des apports en eau que l'on nomme **pilotage** de l'irrigation.

On remarque que, dans certaines configurations, les opérations de prélèvement, de transport, de stockage, et d'une partie ou de la totalité du pompage, peuvent être réalisées en dehors de l'exploitation par des ouvrages collectifs.

On propose de décrire chacune des opérations (sous-fonctions) de l'irrigation et de décrire les paramètres de ces opérations qui ont une influence sur la demande en eau et en énergie de l'irrigation.

3.3.1 Prélèvement

On considère que la sous-fonction prélèvement consiste à capter l'eau dans la ressource naturelle et à l'emmener au niveau du sol. Les aménagements à réaliser pour ce faire dépendent du type de ressource à mobiliser.

Pour les prélèvements dans les cours d'eau, la réalisation relativement simple consiste à aménager la berge et si nécessaire le lit du cours d'eau au point de captage de façon à pouvoir y installer une canalisation d'aspiration munie d'une crépine et d'un clapet anti-retour.

Pour le prélèvement dans les ressources souterraines, il faut creuser un puits ou réaliser un forage. Les puits sont réservés au captage des nappes de faibles profondeurs, environ 20 m maximum, bien que certains puits puissent atteindre plus de 40 m. En revanche, les forages peuvent atteindre des profondeurs beaucoup plus importantes et pouvant aller jusqu'à plusieurs centaines de mètres.

La grandeur qui importe pour l'évaluation de la demande en énergie est la profondeur de la surface d'eau libre lorsque le débit de pompage est établi. Dans le cas des cours d'eau cette profondeur correspond simplement à la différence de hauteur entre la surface du cours d'eau et le sommet de la berge. Cette grandeur varie généralement de moins d'un mètre à une quinzaine de mètres. Concernant les puits et les forages, il convient de tenir compte du rabattement de la nappe en fonction du débit prélevé. Ce phénomène qui correspond à la réponse dynamique de la nappe au changement de régime induit par le pompage peut augmenter la profondeur de prélèvement de 1 à 2 m dans le cas d'un puits avec un débit modéré ($20 \text{ à } 30 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$) à plusieurs dizaines de mètres dans le cas de forages avec des pompes à hauts débits ($150 \text{ à } 200 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$). (voir par exemple la Figure 2- 23).

Tableau 3-8 – Valeurs approximatives de l'efficienne en eau des canaux en fonction du type de la nature du support et de la longueur (Brouwer et al., 1989)

Longueur	Canaux en terre			Canaux avec revêtement
	Sable	Limons	Argile	
(> 2000m)	60%	70%	80%	95%
(200-2000m)	70%	75%	85%	95%
(< 200m)	80%	85%	90%	95%

Figure 2- 25 – Transport de l'eau par canal en béton surélevé et de section hémicylindrique dans le Gharb (longueur : environ 1000 m).



Lorsque le prélèvement dans la ressource est le fait d'un groupement d'agriculteurs ou d'un opérateur public, l'exploitant n'a pas à se soucier directement de cette étape. Dans ce cas, la ressource en eau de l'exploitation est soit une bouche d'irrigation, sous pression, munie d'un compteur, soit une arrivée d'eau par les canaux de distribution collective. Deux paramètres sont alors à prendre en compte. Ce sont, d'une part, la pression disponible et, d'autre part, la disponibilité de la ressource en termes de débit et de tours d'eau.

Pour la suite on désigne par h_r l'altitude, en mètres, du point de prélèvement dans la ressource par rapport à un référentiel fixe à l'échelle du projet. Du point de vue de l'exploitation la valeur de h_r est négative lorsque la ressource est un réseau de distribution sous-pression.

3.3.2 Transport et distribution

Ces opérations consistent à amener l'eau depuis le point de prélèvement jusqu'aux exploitations pour le transport et depuis le point d'accès à l'eau jusqu'aux parcelles pour la distribution. Il existe deux grandes catégories de modes de transport de l'eau :

- les écoulements à surfaces libres ou par canaux,
- le transport en canalisations sous pression.

Les écoulements à surfaces libres ou par canaux

Le transport par canal consiste à canaliser l'écoulement gravitaire de l'eau. L'écoulement utilise l'énergie potentielle correspondant à la différence d'altitude entre le point de départ et le point d'arrivée de l'eau. Dans ce type d'écoulement l'altitude d'un point aval doit toujours être inférieure ou égale à celle d'un point amont. Il convient donc d'adapter le tracé d'un canal aux caractéristiques du terrain. Bien sûr, lorsque la topographie des sites ne permet pas de respecter cette condition il convient de mettre en œuvre des stations de relevage.

Le dimensionnement des canaux consiste à déterminer la section géométrique des canaux en fonction du matériau de revêtement que l'on souhaite utiliser, du débit recherché et de la pente du terrain. Le débit d'un canal peut être estimé avec l'équation empirique de Manning :

$$Q = (A R^{2/3} S^{1/2}) / n \quad \text{où} \quad R = A / P$$

avec : Q débit de l'ouvrage [$m^3 s^{-1}$], A aire de la section d'écoulement [m^2], P périmètre mouillé [m], S pente du canal [SD], n coefficient de résistance de Manning [$s m^{-1/3}$] (Tableau 3-7).

La Figure 3- 5 donne quelques estimations du débit que l'on peut observer dans différents types de canaux proches de ceux utilisés dans le Gharb au Maroc et pour des pentes relativement faibles.

En outre, il convient de tenir compte des pertes en eau des canaux dues aux infiltrations. Ces pertes peuvent être soit associées à la qualité initiale du revêtement soit à la dégradation due à l'âge et/ou à un mauvais entretien. Le Tableau 3-8 donne quelques valeurs de l'efficacité en eau du transport pour différents types de canaux. L'utilisation des canaux en terre est largement répandue pour la distribution de l'eau au sein des exploitations ou dans de petits groupes d'exploitation. Des économies d'eau significatives peuvent être réalisées en améliorant les revêtements de ces canaux (Louhichi, 1999).

Par ailleurs on remarque que les pertes par évaporation dans les canaux sont relativement faibles devant les débits transportés. Dans des conditions extrêmes, une lame d'eau de 10 mm, par surface de canal, est évaporée chaque jour.

Figure 3- 6 - Evaluation des pertes de charge et sensibilité à la température et à la rugosité. Conditions de références : Température 20°C, Longueur 100 m, Diamètre 80 mm, Débit 20 m³ h⁻¹, Rugosité 0,1 mm

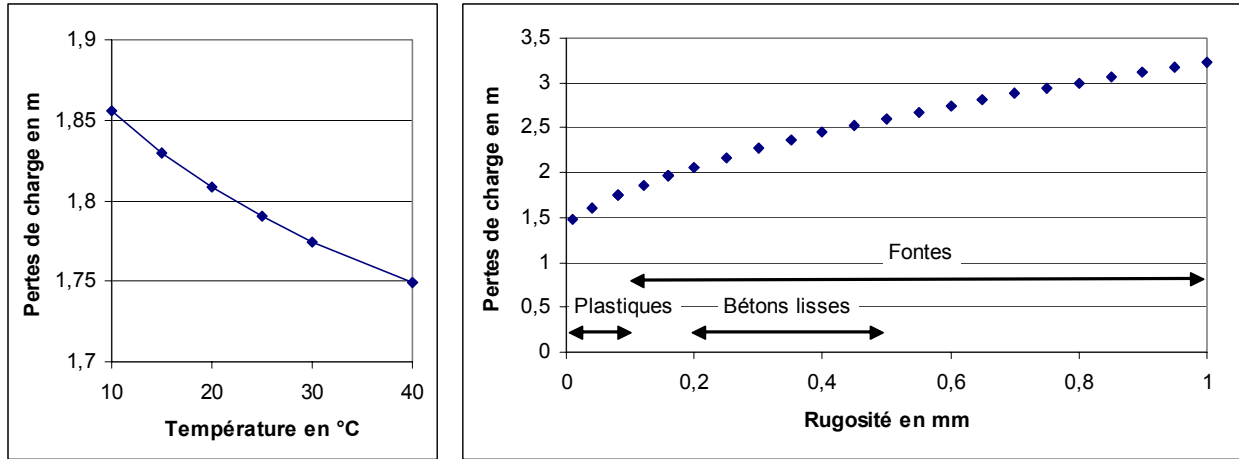
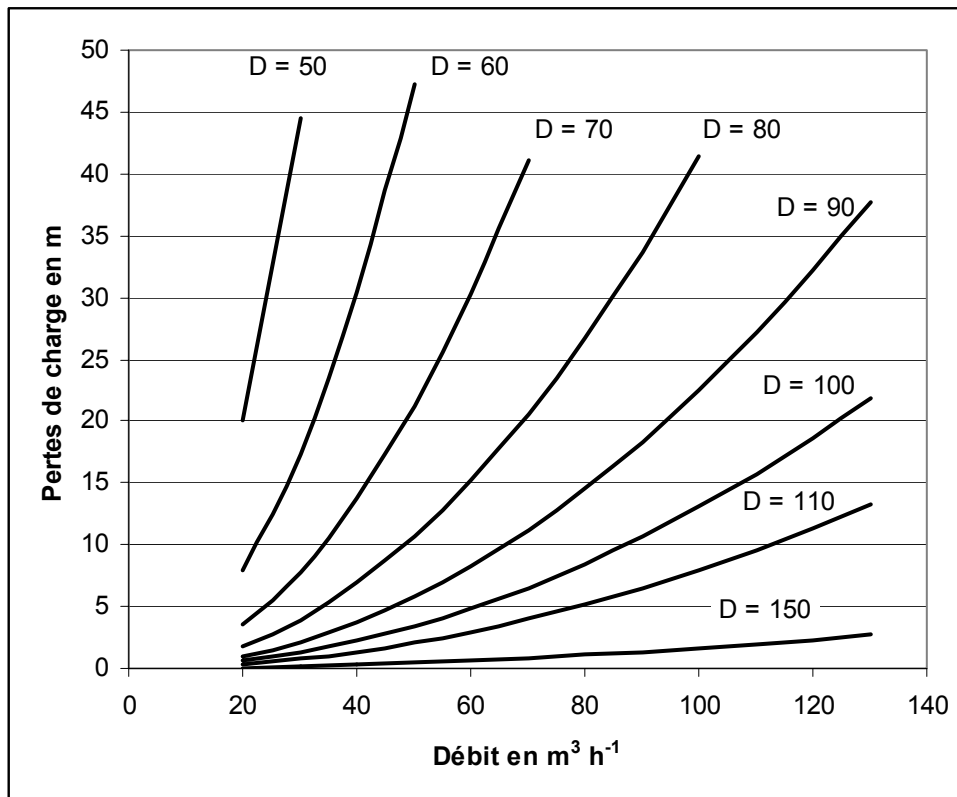


Figure 3- 7 - Evaluation de l'évolution des pertes de charge en fonction du diamètre D (en mm) et du débit (Température 20°C, Longueur 100 m, Rugosité 0,1 mm)



Cela représente pour un canal dont la largeur au niveau de la surface libre est de 4,4 m (présenté Figure 3-5) une perte en eau de 44 m³ d'eau par jour et par kilomètre. Cette valeur est effectivement négligeable par rapport aux volumes transportés.

Pour la suite on désigne par H_r la hauteur de relevage nécessaire pour se conformer à la topographie et par E_f l'efficacité en eau des canaux.

Le transport en canalisations sous pression

Dans ce type de transport, c'est le gradient de pression entre l'amont et l'aval qui met l'eau en mouvement. Dans les canalisations sous pression, l'eau est confinée de sorte que son énergie est conservée aux pertes de charge près.

L'énergie potentielle de l'eau est consommée par la différence de hauteur entre le point de départ et le point d'arrivée, plus élevé, et par les frottements de l'eau avec les canalisations. Ces pertes d'énergie, par frottement, qui se traduisent par une diminution de la pression totale sont nommées pertes de charge régulières dans les portions linéaires du réseau et pertes de charge singulières dans les changements de sections, de direction ou dans les embranchements. Les pertes de charge dépendent des caractéristiques des canalisations, de la distance de transport, et du débit. Les pertes de charge dans une portion linéaire de canalisation de section circulaire peuvent être calculées à l'aide des relations suivantes :

$$H_t = \lambda L V^2 / (2 D g)$$

avec : λ coefficient de perte de charge [SD], L longueur de canalisation [m], V, vitesse moyenne de l'écoulement [m s⁻¹], D diamètre de canalisation [m], g accélération de la pesanteur 9,81 [m s⁻²]. La forme des relations qui permettent de définir le coefficient λ dépend du régime de l'écoulement. Le critère pour définir dans quel régime se situe un écoulement dépend de la valeur du nombre de Reynolds (Idel'Chik, 1986) :

$$Re = V D / \nu$$

où ν est la viscosité cinématique de l'eau à la température considérée [m² s⁻¹].

- Si $Re < 2300$ alors l'écoulement est laminaire et

$$\lambda = 64 / Re$$
- Si $Re > 2300$ alors l'écoulement est transitoire ou turbulent :

$$1/(\lambda)^{1/2} = -2 \log_{10} (k / (3,7 D) + 2,51 / (Re \lambda^{0,5}))$$
 (équation de Colebrook-White)

où k est la rugosité du matériau utilisé [m] (voir Tableau 3-9).

L'équation non linéaire de Colebrook-White peut être résolue par une méthode numérique itérative classique. La Figure 3- 6 donne une idée de l'évolution des pertes de charge en fonction de la température et de la rugosité de la canalisation. Dans la Figure 3- 7 quelques évolutions des pertes de charge en fonction du débit sont données pour différents diamètres de canalisations.

Pour la suite on notera H_t la perte de charge pour le transport et H_d la pertes de charge pour la distribution. Dans le cas où le réseau de transport ou de distribution présente des fuites on notera E_{f_t} et E_{f_d} les efficacités en eau des réseaux de transport et de distribution.

**Tableau 3-9 - Valeurs de la rugosité k pour différents matériaux
(Idel'Cik, 1986)**

Matériaux	k en m
Acier neuf	10^{-4}
Fonte neuve	2.10^{-4} à 10^{-3}
Plastique	3.10^{-5} à 10^{-4}
Béton - moules lisses	2.10^{-4} à 5.10^{-4}
Béton - moules grossiers	1.10^{-3} à 2.10^{-3}

3.3.3 Répartition de l'eau sur les parcelles

Cette opération, que l'on appelle aussi technique d'irrigation à la parcelle, consiste à répartir de façon homogène l'eau sur la surface de la parcelle depuis le point de distribution. Il existe principalement trois familles de systèmes de répartition :

- irrigation gravitaire ou traditionnelle,
- irrigation par aspersion,
- irrigation localisée.

On propose de décrire ci-dessous les principales caractéristiques de ces techniques et quelques-unes de leurs déclinaisons les plus courantes. Comme précédemment, on décrira plus particulièrement les caractéristiques de ces systèmes qui ont une influence sur la demande en eau et en énergie de la pratique de l'irrigation.

En ce qui concerne les techniques d'irrigation à la parcelle, on désigne par E_{fp} l'« efficacité de la répartition de l'eau » à la parcelle que l'on définit comme le rapport entre le besoin en eau des cultures à l'évapotranspiration maximum et le volume total de l'apport au niveau de la parcelle. Par ailleurs, pour les techniques d'irrigation sous pression, on désigne par $P_d(Q)$ la pression dynamique, mesurée en mètres de colonne, au niveau des distributeurs finaux,

avec :

$$P_d(Q) = V^2 / (2 g) = Q^2 / (2 S_b^2 g)$$

où V est la vitesse moyenne de l'eau à la sortie du distributeur final [$m s^{-1}$], Q le débit [$m^3 s^{-1}$] et S_b la section de la buse du distributeur final [m^2].

On remarque que le calcul de P_d ne convient pas pour les goutteurs autorégulants de l'irrigation localisée qui ont leurs caractéristiques propres données par les constructeurs. En outre, la formule ci-dessus n'est donnée qu'à titre indicatif et doit souvent être ajustée pour tenir compte de la forme de la buse.

Irrigation gravitaire

Sont regroupées sous le terme « gravitaire » toutes les techniques de répartition de l'eau sur la parcelle qui utilisent le sol comme support et la gravité comme force de distribution. Les techniques d'irrigation gravitaires sont pratiquées de façon traditionnelle sur la grande majorité des surfaces irriguées dans le monde.

Les trois principales déclinaisons de l'irrigation gravitaire sont :

- l'irrigation par planche, l'eau ruisselle sur des portions larges de parcelle,
- l'irrigation par bassin, on submerge des petits bassins aménagés sur la parcelle,
- et l'irrigation à la raie, l'eau ruisselle dans des raies aménagées entre les rangs de culture sur des distances variables en fonction de la technicité des exploitants.

Ces techniques, et plus particulièrement l'irrigation à la raie, ont récemment bénéficié de progrès techniques qui permettent de réduire de façon considérable les pertes en eau occasionnées par une mauvaise répartition de l'infiltration de l'eau sur la parcelle. Ces progrès concernent notamment les points suivants :

- les techniques de planage mécanique du sol,
- les techniques de distribution de l'eau entre les raies (siphons, rampes à vannettes, gaines souples),
- l'amélioration des connaissances concernant les dynamiques de l'infiltration de l'eau dans le sol ce qui permet d'ajuster la conduite aux apports souhaités.

Tableau 3-10 - Caractéristiques utilisées pour l'évaluation de la demande en énergie utile des principales techniques d'irrigation

	Gammes de pression [mce]*		Efficacités à la parcelle		Remarques
	min	max	min	max	
Gravitaire					
Raie longue	0	4	50%	70%	Efficacité très sensible aux règles de conduite pratiquées par l'exploitant et à la texture du sol
Raie courte	0	3	40%	60%	
Aspersion					
Canon à enrouleur	60	100	60%	75%	Homogénéité de répartition et efficacité sensibles au vent
Pivot	15	50	65%	80%	Possibilité de réaliser un pilotage des apports précis
Couverture intégrale	25	40	65%	80%	
Localisée					
Goutte à goutte	10	20	80%	95%	Pilotage des apports précis
Bas Rhône Languedoc	5	15	80%	90%	Pilotage des apports précis, possibilité de réduire la pression entre 1,5 et 3 mce, exige un plan de répartition des ajutages établi avec précision
Microaspersion, minidiffuseur	7	20	80%	90%	Pilotage des apports précis, adapté au sols sableux

* mce : mètre de colonne d'eau

Cependant l'ensemble de ces évolutions demande des niveaux de technicité et des équipements de travail du sol qui sont encore peu accessibles à la majorité des agriculteurs des pays en développement. Il en résulte que les efficacités en eau constatées sont encore relativement faibles pour une grande majorité des surfaces irriguées en gravitaire. Les efficacités en eau des systèmes gravitaires s'échelonnent entre 40 % et 75 %, pour les pratiques améliorées.

Irrigation par aspersion

Cette pratique consiste à générer des précipitations en utilisant des buses calibrées distribuant l'eau sur une surface pré-établie. L'irrigation par aspersion se divise également en trois sous-techniques que sont :

- les rampes et les quadrillages d'asperseurs (sprinklers) fixes ou déplacés manuellement,
- les rampes mobiles (pivots, rampes frontales),
- les canons avec enrouleur.

Les pertes en eau de l'irrigation par aspersion, 15% à 40% des apports, sont principalement liées à l'évaporation, au ruissellement si l'irrigation est trop intense, et dans certains cas à des incompatibilités entre la géométrie de la distribution et celle de la parcelle. L'homogénéité de répartition spatiale de l'eau dépend des caractéristiques techniques des systèmes et des conditions climatiques lors de l'application. C'est le cas du vent en particulier, principal facteur expliquant les pertes par évaporation et transport. La pression nominale élevée requise pour le fonctionnement des distributeurs de l'irrigation par aspersion (de 10 à 90 m) induit des consommations d'énergie importantes. Cette pression augmente la portée des distributeurs. Suivant les techniques, l'augmentation de la densité ou de la densité équivalente (déplacement d'une rampe) des points de distribution permet de réduire la portée pour obtenir une irrigation homogène. Lorsque le système requiert la mise en mouvement d'une rampe mobile ou d'un enrouleur grâce à un moteur hydraulique ou électrique, il convient de tenir compte de l'énergie nécessaire. Dans le cas de l'enrouleur on considère que la turbine génère une perte de charge d'environ 8 m, alors que pour un pivot chaque élément de 50 m est muni d'une motorisation indépendante le plus souvent électrique d'une puissance électrique d'environ 350 W. Dans ce dernier cas l'énergie électrique pour la mise en mouvement sera ajoutée à la consommation d'énergie finale.

Irrigation localisée

Cette pratique consiste à réaliser des apports précis dans le temps et dans l'espace par la mise en œuvre d'un réseau relativement dense de distributeurs de faible débit (de 2 à 50 l/h). Il existe une large gamme de distributeurs. On distingue notamment :

- les goutteurs (autorégulants et non-autorégulants),
- les micro diffuseurs et micro asperseurs,
- les ajutages calibrés,
- les gaines perméables dites aussi « poreuses ».

La possibilité de réaliser des apports précis à la fois dans l'espace et dans le temps permet de se rapprocher sensiblement des besoins des cultures et de minimiser les pertes par évaporation ou par infiltration. Ces pertes, le plus souvent inférieures à 30% des apports, peuvent être réduites à 10% voire 5% dans des systèmes bien conçus et bien utilisés. Ces systèmes réclament des eaux propres donc une filtration qui induit une perte de charge supplémentaire variant de 3 à 8 m de colonne d'eau (m_{ce}).

Encadré 3-6 – Démarche de dimensionnement d'une pompe

Le dimensionnement d'une pompe consiste à choisir, parmi un panel de pompes disponibles, la pompe qui permet de satisfaire les besoins en termes de débit et de hauteur manométrique d'un système d'irrigation avec le meilleur rendement.

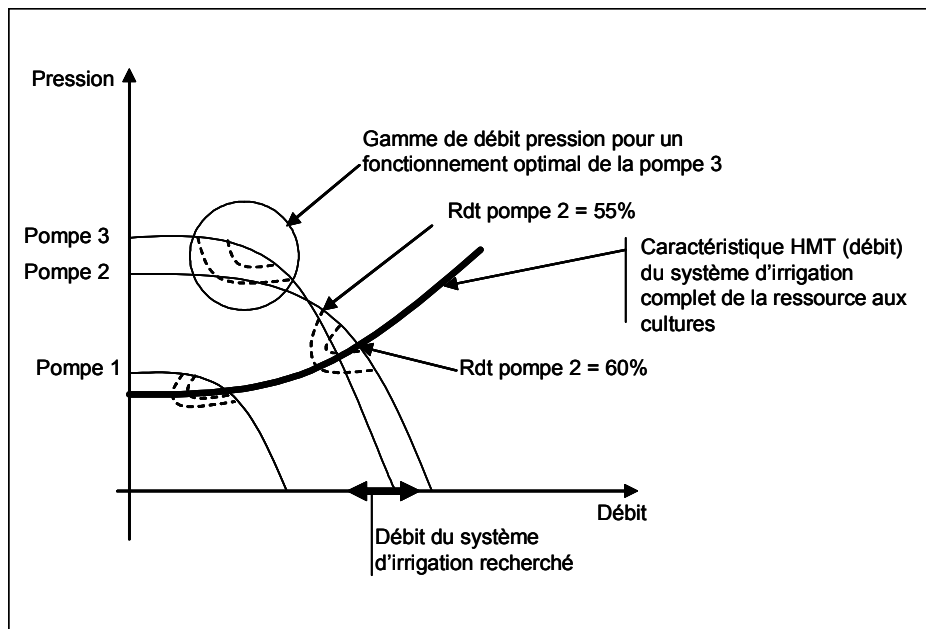
Il convient d'abord de tracer l'évolution de la pression requise par le système en fonction du débit. Pour ce faire, on additionne la différence de hauteur entre le point de prélèvement et la parcelle, les pertes de charge occasionnées par frottement dans les canalisations, et l'ensemble des pertes de charge singulières générées par le circuit hydraulique (les vannes, les filtres, les changements de direction et de section,...) et la pression dynamique au niveau des distributeurs finaux.

$$P_{\text{système}}(Q) = (H_p - H_r) + H_t(Q) + H_d(Q) + P_d(Q)$$

avec : $P_{\text{système}}(Q)$ la pression requise par le système d'irrigation complet en fonction du débit, H_p l'altitude de la parcelle, H_r l'altitude du point de prélèvement dans la ressource.

On trace ensuite les courbes de pression en fonction du débit des pompes disponibles. Le point d'intersection entre la courbe d'une pompe et celle du système d'irrigation donne le point de fonctionnement de l'ensemble. On choisit la pompe qui satisfait le besoin en termes de débit et dont le rendement est optimal.

Figure 3- 8 – Choix de la pompe adaptée au système. La pompe 1 ne convient pas car elle ne permet pas de faire fonctionner le système d'irrigation à son débit nominal. La pompe 2 permet de faire fonctionner le système à son débit nominal mais pour un régime qui est éloigné du rendement optimal. La pompe 3 permet de faire fonctionner le système à son débit nominal avec un rendement énergétique optimal (60%).



Bien que les pompes d'irrigation puissent être choisies de façon à atteindre des rendements énergétiques de 65 à 75 % pour la conversion d'énergie finale en énergie hydraulique, il est fréquent d'observer sur le terrain des rendements d'environ 45 % voire plus bas. Ces observations faites dans le Lot et Garonne et au Maroc sont confirmées par Luc et al. (2004) pour le cas de la Tunisie.

Les pressions requises par les systèmes d'irrigation localisée sont relativement faibles (de 5 à 25 m_{ce}) et les consommations d'énergie sont réduites par rapport aux systèmes d'irrigation par aspersion.

3.3.4 Pompage

Le but du pompage est de fournir au système d'irrigation l'énergie hydraulique nécessaire à son fonctionnement. Cette énergie s'exprime comme le produit du poids de l'eau à déplacer par la hauteur équivalente sur laquelle il faut déplacer cette eau. En d'autres termes, l'énergie hydraulique que doit fournir la pompe est proportionnelle au produit du volume de l'eau prélevé par la hauteur manométrique (en mètre de colonne d'eau) requise par le circuit hydraulique que constitue l'ensemble du système d'irrigation de la ressource en eau jusqu'à la culture. Pour réaliser le dimensionnement, en puissance, de la pompe, les données nécessaires sont donc le débit et la hauteur manométrique.

Dans le cas d'une nouvelle installation ou d'un remplacement, le choix de la pompe, lorsque le réseau commercial garantit l'accès à une gamme suffisamment large, s'effectue sur la base des caractéristiques de l'ensemble des autres éléments du système. Ce choix consiste à identifier la pompe dont la gamme de fonctionnement est la mieux adaptée à la gamme de fonctionnement recherchée au niveau du système d'irrigation (Encadré 3-6).

En dehors du pompage motorisé il est à noter que le pompage à motricité humaine et animale est encore utilisé dans de nombreux pays en développement. Ces modes de pompage limitent considérablement les volumes qui peuvent être mobilisés et constituent au même titre que le travail de la terre une limite à la surface qui peut être exploitée par chaque actif agricole.

Enfin on remarque que dans les sites favorables le pompage éolien peut constituer une alternative avantageuse au pompage à motricité humaine et au pompage utilisant les énergies commerciales. Dans ce cas, une bonne connaissance des vitesses de vent moyennes par saison est requise pour optimiser le dimensionnement. Par ailleurs, la réalisation d'un réservoir peut améliorer la disponibilité de l'eau et réduire les contraintes sur le pilotage des apports.

Pour l'évaluation de la demande en énergie des systèmes complets, on retiendra que le système de pompage est caractérisé par le rendement énergétique du pompage noté Rdt_{pompage} , qui peut être décomposé en produit du rendement de la pompe Rdt_{pompe} et du rendement énergétique de la motorisation Rdt_{moteur} .

3.3.5 Pilotage de l'irrigation

Le pilotage est une sous-fonction de l'irrigation un peu particulière. En effet, cette sous-fonction indispensable de l'irrigation ne met pas en œuvre des flux physiques mais des flux d'informations qui permettent de répondre aux trois questions :

- Quand irriguer ? Cette question revient à déterminer le moment où la plante commence à souffrir de stress hydrique, autrement dit le moment où la réserve utile du sol est épuisée.
- Quels volumes apporter aux cultures ? Il s'agit de déterminer le volume d'apport en eau qui est vraiment utile aux cultures en notant que lorsque l'apport en eau est supérieur au volume nécessaire pour combler la réserve utile dans la zone des racines, l'eau restante s'infiltre dans des zones du sol qui ne sont plus accessibles à la plante.
- Comment utiliser la ressource et le matériel disponibles pour satisfaire au mieux le besoin des cultures tout en minimisant les prélèvements ?

Encadré 3-7 - Influence du mode de pilotage de l'irrigation sur le volume d'eau prélevé et sur le rendement des cultures (cas de l'irrigation de la betterave au Maroc)

On se propose d'étudier la sensibilité du rendement des cultures et l'implication en termes de volume prélevé pour l'irrigation de 4 modes de pilotage de l'irrigation que l'on compare avec le cas de la production en agriculture pluviale. On choisit d'analyser ces aspects de l'irrigation pour le cas de la betterave (de début novembre à mi juin) dans la région du Gharb. Le sol considéré présente une réserve utile de 100 mm/m.

Afin d'éviter les cas particuliers qui pourraient se présenter du fait d'une répartition de la pluviométrie favorable ou défavorable l'évaluation est réalisée pour le cas de 20 séries pluviométriques différentes. Ces séries pluviométriques sont des répartitions aléatoires de la pluviométrie mensuelle moyenne pour le climat de la zone de Rabat. La pluviométrie moyenne sur la saison considérée est de 407 mm.

On considère dans un premier temps le cas de l'agriculture pluviale. Ce cas permet de disposer, pour chaque répartition de la pluviométrie, du rendement de la culture et de la part du volume des précipitations qui s'infiltré à une profondeur hors de portée des racines.

On définit ensuite 4 modes de pilotage de l'irrigation suivant les spécifications suivantes :

- **mode 1 – pilotage optimal** : à chaque fois que la réserve facilement utilisable du sol est épuisée l'apport exact du volume nécessaire pour restaurer la réserve utile est réalisé.
- **mode 2 – pilotage optimal avec tour d'eau de huit jours** : la ressource en eau n'est disponible que tous les huit jours. A ces dates, à chaque fois que la réserve facilement utilisable du sol est épuisée l'apport exact du volume nécessaire pour combler la réserve utile est pratiqué.
- **mode 3 – mode 2 + volumes par tranches** : en plus des tours d'eau, les volumes ne peuvent être alloués que par tranche de deux heures d'irrigation avec des débits de 20 l/s. Dans ce cas le volume choisi pour les apports est celui qui est le plus proche du volume nécessaire pour combler la réserve utile.
- **mode 4 – mode 3 avec surestimation systématique du besoin d'une tranche de deux heures** : la procédure appliquée pour le choix du volume des apports est la même que pour le mode 3, mais les apports pratiqués sont systématiquement réévalués d'un volume correspondant à une tranche horaire de 2 heures d'irrigation.

Ensuite les modes 2, 3 et 4 sont modifiés de telle façon que la durée du tour d'eau soit de 15 jours au lieu de 8 jours et l'évaluation est réalisée dans le cas de 10 répartitions différentes de la pluviométrie.

Pour tous les cas, les infiltrations sont déterminées par une simulation du bilan hydrique et les rendements sont établis conformément à la méthode proposée au § 2.3.1.

Tableau 3-11 - Influence du mode de pilotage de l'irrigation sur le rendement des cultures et sur les volumes d'eau prélevés

	Coefficient de réduction du rendement	Rendement	Production de sucre	Apport en eau d'irrigation	Infiltrations	Infiltrations suite aux irrigations	Efficiéce du pilotage
		t/ha	t/ha		mm/saison		
Pluviale	0,37	22,2	3,3		58		
mode 1	1	60	9,0	346	86	28	92%
Tours d'eau de 8 jours							
mode 2	0,94	56,4	8,5	328	86	28	91%
mode 3	0,94	56,4	8,5	321	74	16	95%
mode 4	0,94	56,4	8,5	346	103	45	87%
Tours d'eau de 15 jours							
mode 2	0,88	52,8	7,9	283	84	26	91%
mode 3	0,87	52,2	7,8	261	80	22	92%
mode 4	0,88	52,8	7,9	295	95	37	87%

Les méthodes d'évaluation et les moyens mis en œuvre pour répondre à ces questions varient suivant la technicité des exploitants et les moyens disponibles pour les mesures de teneur en eau du sol, de débit, et d'évapotranspiration.

La première démarche adoptée par les exploitants pour répondre à ces questions consiste à observer l'état de la végétation et à réaliser un apport dès que les cultures montrent des signes de stress hydrique (flétrissement, changement de couleur des feuilles). La dose de l'apport est jugée suffisante lorsque le sol semble saturé ou après durée établie par expérience.

La deuxième démarche consiste à réaliser un bilan hydrique du sol avec plus ou moins de finesse. La qualité et la finesse du bilan hydrique, dépendent de la précision de l'estimation des paramètres et des variables suivantes :

- la réserve utile et la réserve facilement utilisable du sol,
- l'évapotranspiration pour chaque jour de culture,
- la quantité d'eau restant dans le sol à une date donnée,
- la profondeur d'enracinement,
- le volume des apports.

Par cette méthode et en faisant des hypothèses sur la météorologie à quelques jours, l'agriculteur peut prévoir la date à laquelle la réserve facilement utilisable des différentes parcelles sera épuisée et planifier la réalisation des apports en fonction du matériel et des débits disponibles.

En outre, l'agriculteur peut s'appuyer sur des mesures de la teneur en eau du sol, ces mesures lui permettant de valider l'évaluation faite de la quantité d'eau restant dans le sol.

Dans les configurations où le prélèvement est effectué dans une nappe libre ou dans un cours d'eau, la part des volumes prélevés qui s'infiltrent n'est pas consommée et retourne à la ressource. L'optimisation du pilotage n'a alors que peu d'influence sur la consommation nette en eau de l'irrigation. Dans une configuration où les prélèvements sont effectués dans une nappe captive ou dans les cas où les infiltrations se font vers une nappe de mauvaise qualité (salinité élevée par exemple), alors l'optimisation du pilotage permet d'optimiser la consommation d'eau. En outre, dans tous les cas, l'optimisation du pilotage de l'irrigation permet de réduire le besoin en termes de prélèvement par tonne produite et donc la demande en énergie de l'irrigation par tonne produite.

Deux grandeurs complémentaires peuvent être utilisées pour évaluer l'efficacité du pilotage de l'irrigation :

- le rapport entre le volume utile et le volume apporté sur la parcelle (indépendamment des problèmes de répartition spatiale) que l'on nomme efficacité en eau du pilotage et que l'on note E_{pilot} ,
- la réduction de rendement de la culture liée aux périodes de stress hydrique.

Les résultats de simulation présentés dans l'Encadré 3-7, mettent en évidence l'influence du mode de pilotage de l'irrigation sur le rendement des cultures d'une part et sur la proportion utile des prélèvements d'autre part. La durée du tour d'eau est le facteur qui présente l'influence la plus significative sur les rendements et sur l'efficacité du pilotage.

Encadré 3-8 - Définition et évaluation de la signature eau-énergie de quelques systèmes d'irrigation complets

On propose dans cet encadré de comparer la signature eau-énergie de cinq configurations rencontrées fréquemment en irrigation :

- **Gravitaire 1** : irrigation gravitaire à partir d'un puits, utilisant une gaine souple pour la répartition sur la parcelle,
- **Gravitaire 2** : irrigation gravitaire à partir d'un puits, utilisant des seguias en terre pour la distribution sur les parcelles,
- **Aspersion 1** : irrigation par aspersion à partir d'un puits, utilisant un canon à enrouleur,
- **Aspersion 2** : irrigation à partir d'un puits, utilisant un quadrillage d'asperseurs,
- **Localisé** : irrigation localisée à partir d'un puits.

On remarque que ces considérations sur la signature eau-énergie des infrastructures d'irrigation ne prennent pas en compte les problèmes de compatibilité entre les cultures et les systèmes d'irrigation.

Les résultats présentés pour l'énergie spécifique (par unité de volume rendu au niveau des cultures) sont les besoins en énergie utile des différents systèmes. Pour calculer le besoin en énergie finale (énergie achetée par l'exploitant agricole), il convient de tenir compte du rendement énergétique de la pompe, d'une part, et du moteur d'autre part.

		Gravitaire 1	Gravitaire 2	Aspersion 1	Aspersion 2	Localisé
Débit	m ³ /h	20	20	30	20	15
Ressource en eau		Puits	Puits	Puits	Puits	Puits
Profondeur	m	10	10	10	10	10
Filtration						
Perte de charge	m					5
Transport		Canal béton	Tuyau ø 90 mm	Tuyau ø 100 mm	Tuyau ø 90 mm	Tuyau ø 90 mm
Distance	m	1000	1000	1000	1000	1000
Perte de charge ou dénivelé	m	1	10	13	10	6
Efficience		0,95	1	1	1	1
Distribution		Canal terre	Gaine souple	-	-	-
Distance	m	200	200			
Perte de charge	m	0	2			
Efficience		0,8	0,95			
Répartition sur la parcelle		Raie courte	Raie courte	Canon à enrouleur **	Asperseurs	Goutteurs
Pression requise	m	0	0	80	35	20
Efficience		0,6	0,6	0,7	0,75	0,9
Signature eau-énergie de l'ensemble des systèmes						
Energie utile spécifique	kJ/m ³ *	237	379	1443	719	447
Energie utile spécifique	kWh/m ³ *	0,066	0,105	0,401	0,200	0,124
Efficience globale		0,46	0,57	0,70	0,75	0,90

* l'énergie spécifique est calculée pour un m³ d'eau réparti de façon homogène au niveau des cultures

** la pression requise au niveau de l'enrouleur comprend la perte de charge dans la turbine d'entraînement, la perte de charge dans le tuyau souple de l'enrouleur et la pression requise au niveau du canon

On peut souligner que l'utilisation de canalisations basse pression pour les techniques gravitaires permet **d'améliorer nettement l'efficience en eau** globale du système. Cependant, cette option technique implique une **augmentation significative du coût en énergie** de chaque m³ d'eau utile pour la culture. Un arbitrage est nécessaire entre économie d'eau et économie d'énergie.

Concernant les techniques d'irrigation sous-pression on remarque que les **performances énergétiques du système d'irrigation par canon à enrouleur sont médiocres** du fait d'une pression de fonctionnement élevée. Ce besoin de pression correspond à la nécessité de répartir l'eau à partir d'un seul point sur une trajectoire rectiligne.

3.3.6 Demande en énergie de quelques configurations

La demande en énergie utile

L'énergie mécanique à mettre en œuvre dans les différents systèmes d'irrigation correspond au travail à fournir pour déplacer le volume d'eau nécessaire d'une hauteur équivalente à la hauteur manométrique totale mobilisée par le système. Cette quantité de travail peut s'exprimer par la relation suivante :

$$W = \text{Force} \times \text{Déplacement} = M g \text{ HMT} = \rho g V \text{ HMT}$$

avec : W travail à fournir [J], M masse d'eau déplacée [kg], g accélération de la pesanteur [m s^{-2}], ρ masse volumique de l'eau [kg m^{-3}], V volume d'eau déplacé [m^3], HMT hauteur manométrique totale [m].

On désigne par énergie utile le travail mécanique à fournir pour l'ensemble des sous-fonctions de l'irrigation. Pour certaines configurations des ressources en eau, une partie ou la totalité de l'énergie utile requise peut être disponible sous forme d'énergie potentielle. Pour toutes les autres configurations il faut fournir du travail mécanique.

Un système d'irrigation peut être décrit comme l'enchaînement des éléments fonctionnels détaillés dans les paragraphes précédents. La demande en énergie utile d'un système dépend de l'ordre d'enchaînement et des caractéristiques de chaque sous-fonction. On considère un système constitué de sous-fonctions numérotées de 1 à n à partir de la sous-fonction la plus proche de la culture et de caractéristique h_i et Efe_i . La relation ci-dessous donne la demande en énergie utile de ce système pour mettre un volume d'eau V_d à disposition du couple sol-culture :

$$E_{\text{utile}} = \sum_{i=1}^n (h_i / \prod_{j=1}^i Efe_j) \rho g V_d$$

avec : E_{utile} énergie utile requise par le système [J], h_i hauteur manométrique requise pour le fonctionnement de la sous-fonction i [m], Efe_j efficacité en eau de la sous-fonction j [SD], V_d volume mis à disposition de la culture [m^3].

Afin de caractériser un système d'irrigation par sa demande en énergie utile et en eau, indépendamment de la demande climatique en eau, on définit la signature eau-énergie du système au moyen de deux grandeurs caractéristiques que sont :

- l'énergie utile nécessaire pour acheminer un mètre cube d'eau au niveau des cultures que l'on nomme énergie utile spécifique du système :

$$E_{\text{utile.spécifique}} = \sum_{i=1}^n (h_i / \prod_{j=1}^i Efe_j) \rho g$$

- l'efficacité en eau globale du système :

$$Ef_{\text{globale}} = \prod_{i=1}^n Efe_i$$

On remarque que ces deux grandeurs ne concernent que les infrastructures physiques et qu'elles n'intègrent pas les aspects liés au pilotage de l'irrigation.

Dans l'Encadré 3-8 on observe que le besoin en énergie utile peut varier de façon significative en fonction des pressions requises par les différentes sous-fonctions, d'une part, et de leurs efficacités en eau d'autre part.

Encadré 3-9 - L'approvisionnement en énergie finale, un problème à intégrer dans les stratégies de développement de l'irrigation

La mise à disposition de l'énergie finale à des tarifs accessibles constitue une étape clé du développement de l'irrigation. En effet, **le manque de disponibilité et le coût de l'énergie peuvent constituer des freins significatifs à la valorisation des ressources en eau** notamment d'origine souterraine. Pour faire face à ce problème, plusieurs solutions peuvent être envisagées en fonction du type de ressource à valoriser.

Pour valoriser les ressources **en eau de surface**, les grands aménagements de stockage et de distribution de l'eau peuvent être privilégiés. Dans ce cas, les exploitants agricoles n'ont pas à se préoccuper de l'accès à l'énergie pour l'irrigation à moins d'avoir recours à un bassin de stockage et à un système sous pression. L'approvisionnement énergétique peut alors être conçu pour satisfaire la demande des stations de pompage pour l'alimentation des réseaux collectifs. Dans ce cas le tarif de l'eau facturée aux exploitants agricoles prend en compte le coût de l'énergie.

En revanche, pour mobiliser les ressources en **eaux souterraines**, il semble plus judicieux de favoriser le pompage local. Dans ce cas les exploitants sont en charge de la réalisation de l'ensemble des sous-fonctions de l'irrigation, du prélèvement dans la ressource à la répartition au niveau des cultures. Le développement de l'irrigation à partir de ressources en eaux souterraines, lorsque celles-ci sont disponibles, **peut être favorisé par la mise à disposition d'énergie subventionnée**. Il s'agit alors de définir quel type d'énergie il est préférable de subventionner et quelles seront les implications de cette démarche sur les ressources en eau et sur la demande en énergie.

Dans un pays producteur de pétrole, par exemple l'Egypte, le prix du gasoil, très bas, permet aux agriculteurs de pomper à moindre coût. En revanche, en Inde, le pétrole représente une denrée relativement coûteuse alors que les réserves et la production de charbon produit à l'échelle nationale sont beaucoup plus accessibles. La solution mise en œuvre en Inde pour favoriser l'utilisation de cette ressource énergétique et des ressources en eaux souterraines est la production d'énergie électrique et sa distribution en milieu rural par l'extension du réseau électrique. Cette politique conduit à une mobilisation d'environ 30 % de l'électricité produite pour l'irrigation (Goossens et Bonnet, 2001).

Dans le cadre de cette politique d'extension du réseau électrique pour l'irrigation, l'Inde doit faire face à de nombreux problèmes organisationnels et techniques. La surcharge des réseaux électriques en période de pointe conduit notamment à une dégradation de la qualité du courant électrique (chutes de tensions, dégradation du facteur de puissance). En outre, l'énergie est facturée aux exploitants de façon forfaitaire, ce qui conduit à des problèmes de surconsommation et de recouvrement des coûts de production de l'électricité (Shah et al., 2003).

On retrouve cette problématique de mise à disposition et de tarification de l'électricité pour le pompage des ressources souterraines en agriculture dans de nombreux pays. On peut citer, par exemple, la Syrie (Gül, 2005), le Mexique (Scott et al., 2001), le Pakistan (Shah et al., 2000), l'Etat de l'Oregon aux Etats-Unis (Jaeger, 2004), la Tunisie (Luc, 2004), ...

Pour évaluer la demande en énergie utile d'une configuration donnée, il convient de tenir compte également de la demande climatique des cultures et de l'efficacité du pilotage. On définit, ainsi, pour un contexte, la demande en énergie utile par la relation ci-dessous :

$$E_{\text{utile}} = E_{\text{utile spécifique}} \cdot B_{\text{culture}} / E_{\text{f}_{\text{pilot}}}$$

avec : E_{utile} énergie utile requise pour l'irrigation [J/ha], $E_{\text{utile spécifique}}$ énergie utile spécifique requise pour le fonctionnement du système d'irrigation considéré [J/m³], B_{culture} besoins en eau de la culture dans le contexte climatique considéré déduction faite des précipitations [m³/ha], $E_{\text{f}_{\text{pilot}}}$ efficacité en eau du pilotage prenant en compte la technicité des exploitants et les contraintes de disponibilité des ressources et des infrastructures [SD].

Demande en énergie finale

Afin de déterminer le coût de l'énergie pour l'irrigation, il est utile de prendre en compte les rendements de conversion du pompage (production d'énergie hydraulique à partir d'énergie mécanique), d'une part, et de conversion de la motorisation (production d'énergie mécanique à partir d'énergie électrique ou de carburant), d'autre part. Les rendements des pompes dans le cas d'un dimensionnement optimal varient de 55 à 85 % en fonction de la puissance. Concernant les rendements des moteurs ils sont compris pour des dimensionnements optimaux entre 80 et 93% pour des moteurs électriques. Pour les moteurs thermiques, les rendements sont réduits à environ 34 % dans de bonnes conditions d'utilisation. On exprime l'énergie finale requise par la relation suivante :

$$E_{\text{finale}} = (E_{\text{utile}} / R_{\text{dt}_{\text{pompe}}}) / R_{\text{dt}_{\text{moteur}}}$$

avec : E_{finale} énergie finale requise pour l'irrigation [J/ha], $R_{\text{dt}_{\text{pompe}}}$ rendement énergétique de la pompe (rapport entre l'énergie hydraulique produite et l'énergie mécanique consommée) [SD], $R_{\text{dt}_{\text{moteur}}}$ rendement énergétique du moteur (rapport entre l'énergie mécanique produite et l'énergie finale consommée) [SD].

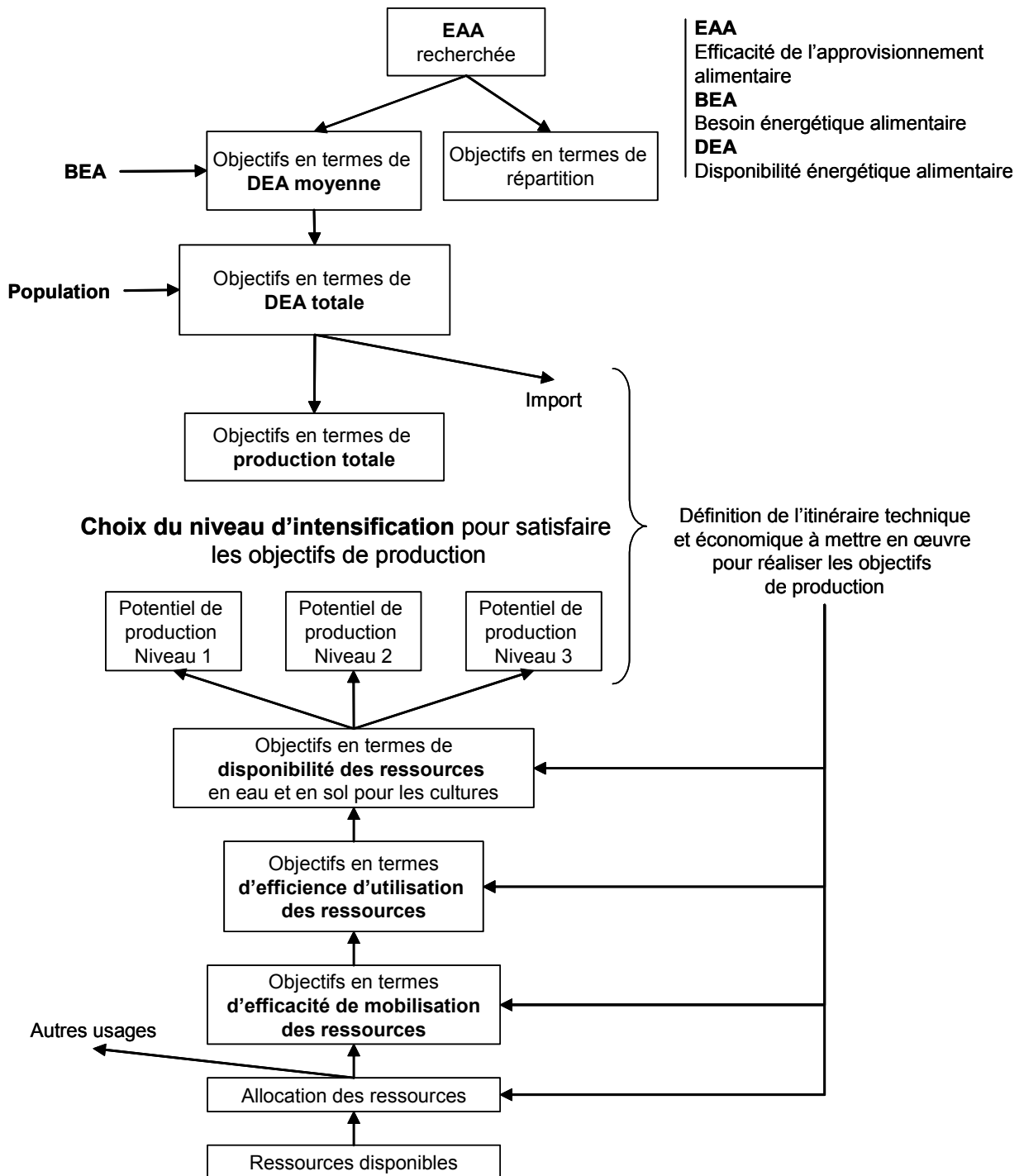
Demande en énergie primaire

Enfin, il peut être utile, pour des approches à l'échelle nationale, d'évaluer la demande en énergie primaire de l'irrigation. Concernant l'utilisation de combustible fossile (essence, gasoil), on peut, en première approximation, considérer qu'il s'agit de la demande en énergie finale. En revanche, dans le cas d'une motorisation électrique, il convient d'évaluer la quantité d'énergie primaire nécessaire à la production de l'énergie électrique consommée au niveau de l'exploitation. Il faut, alors, connaître la répartition des moyens de production et leur rendement de conversion ($R_{\text{dt}_{\text{conversion}}}$) d'une part et les pertes du réseau de transport et de distribution d'autre part. Une liste des moyens de production de l'électricité les plus courants et des valeurs indicatives de rendement de conversion est proposée ci-dessous :

- centrale hydroélectrique et éoliennes ($R_{\text{dt}_{\text{conversion}}} = 1$),
- centrale thermique classique à gaz, fioul ou charbon ($R_{\text{dt}_{\text{conversion}}} = 0,34$),
- centrale nucléaire de type « réacteur à eau pressurisée » ($R_{\text{dt}_{\text{conversion}}} = 0,31$),
- centrale à gaz à cycle combiné ($R_{\text{dt}_{\text{conversion}}} = 0,55$).

Les pertes de transport et de distribution sont variables suivant la qualité des réseaux et la tension des réseaux de transport. A titre indicatif, ces pertes s'élèvent à 7% en France et à environ 20% en Inde.

Figure 4- 1 – Mode d’élaboration des objectifs



4 Objectifs de l'alimentation et de l'irrigation

Un objectif de développement peut être défini comme un état que doit atteindre une zone géographique au terme d'une période donnée. L'état d'une zone peut être caractérisé par une série d'indicateurs portant sur des aspects sensibles. Ce mode de formulation des objectifs est utilisé par de nombreux organismes de développement ou de gestion. Le PNUD (Programme des Nations Unies pour le Développement), par exemple, utilise dans ses rapports sur le développement humain un indicateur synthétique (l'indicateur de développement humain – IDH) qui regroupe des indicateurs spécifiques portant sur la longévité, l'éducation et le niveau de vie (PNUD, 2001). Pour la caractérisation de l'état de développement d'une zone et les objectifs associés nous utiliserons des indicateurs d'efficacité, des indicateurs de durabilité physique, et des indicateurs de productivité.

4.1 Efficacité de l'approvisionnement alimentaire

L'**efficacité** est définie comme l'aptitude d'un appareil ou d'un système à remplir sa ou ses fonctions principales. Lorsqu'il existe des données quantitatives, l'efficacité s'écrit comme le rapport entre les résultats obtenus et les objectifs fixés.

4.1.1 Efficacité générale

Atteindre une bonne **efficacité de l'approvisionnement alimentaire (EAA)** est la finalité principale des systèmes étudiés. A l'échelle nationale, on propose dans un premier temps de définir l'efficacité générale du système d'approvisionnement alimentaire comme son aptitude à minimiser la part de la population d'un pays qui est sous-nourrie (FAO, 2003b). Ce qui se traduit par la relation suivante :

$$EAA = 1 - (\text{Part des sous-nourris})$$

Objectif en termes de disponibilité énergétique alimentaire (DEA)

Afin d'établir un lien entre l'efficacité du système d'approvisionnement et la disponibilité énergétique alimentaire (DEA en kcal hab⁻¹ j⁻¹), on envisage deux approches.

La première consiste à établir une relation de corrélation entre la disponibilité énergétique alimentaire (DEA) et l'efficacité générale. D'après la forme du nuage de points obtenu pour 156 pays on propose l'équation suivante de type sigmoïdal, fréquemment utilisée pour rendre compte de phénomènes naturels (Carrillo et Gonzales, 2002) :

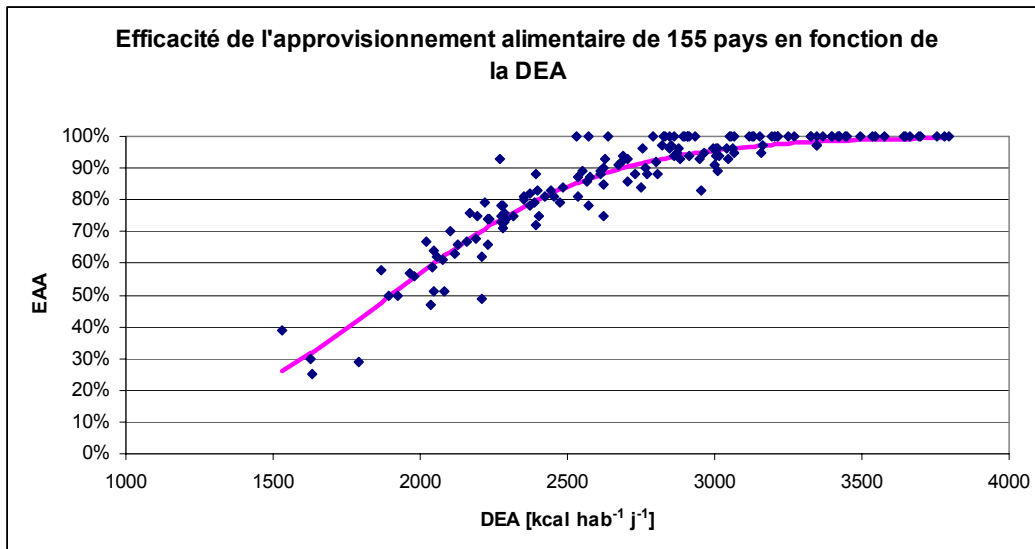
$$EAA (DEA) = 1 / \{1 + \exp [(DEA_0 - DEA) / C]\}$$

avec : DEA₀ la valeur de la DEA pour une EAA de 50%, C un paramètre lié à la disparité des besoins et de la répartition de la DEA entre les différentes populations [kcal hab⁻¹ j⁻¹].

En appliquant une régression par la méthode des moindres carrés sur l'ensemble des points et pondérée par la population des pays considérés on calcule une valeur pour DEA₀ et pour C (Figure 4- 2). On dispose ainsi d'une relation permettant d'estimer l'efficacité du système d'approvisionnement alimentaire en fonction de la DEA à l'échelle nationale :

$$EAA (DEA) = 1 / \{1 + \exp [(1800 - DEA) / 480]\}$$

Figure 4- 2 – Relation entre l'efficacité de l'approvisionnement alimentaire et la disponibilité énergétique alimentaire pour 156 pays du monde. L'efficacité de l'approvisionnement alimentaire est définie comme la part de la population qui ne présente pas de problème de malnutrition (Estimation de la sous-nutrition : FAO, 2003b ; DEA : FAOSTAT) .



Encadré 4-1 – Les trois carences en micro nutriments les plus préoccupantes

La carence en fer est la principale cause d'anémie. L'anémie est définie comme une diminution de la capacité du sang à transporter de l'oxygène due à une diminution de la quantité de globules rouges. L'OMS (WHO, 2002), évalue à 2 milliards le nombre de personnes anémiques dans le monde. L'anémie due aux carences en fer frappe 50% des femmes enceintes dans le sud de l'Asie et plus de 25% des femmes enceintes en Afrique subsaharienne et en Amérique centrale. Le fer est présent dans beaucoup d'aliments d'origine animale ou végétale. Cependant, le fer présent dans les produits d'origine animale est mieux assimilé par l'organisme (plus bio disponible). De plus, il y a dans l'alimentation des facteurs qui améliorent (l'acide ascorbique – vitamine C - présent dans de nombreux fruits et végétaux frais) ou réduisent (les phytates présents dans les graines et les fruits à coquille, et les légumineuses et les tanins présents dans le thé, le café et le vin rouge) la capacité d'absorption du fer par l'organisme.

La carence en iode est repérable par un gonflement de la thyroïde et se traduit par une réduction des capacités mentales. La population concernée par un déficit en iode est estimée à 741 millions d'habitant dont 50 millions présentent des déficiences mentales irréversibles (WHO, 2002). Les sources d'iode dans la nutrition sont les produits de la mer, les œufs, la viande, le lait et les céréales (à condition que l'iode soit disponible dans le sol). Pour lutter contre ce problème une stratégie simple consiste à enrichir le sel de table en iode.

La carence en vitamine A affecte particulièrement la vision et le système immunitaire. En outre, la vitamine A est requise pour la croissance et la réparation des tissus. L'OMS estime que 100 à 140 millions d'enfants présentent des carences en vitamine A. Chaque année, entre 250000 et 500000 enfants perdent la vue à cause de cette carence et la moitié d'entre eux meurent dans l'année qui suit. Les carences en vitamine A responsables de défenses immunitaires faibles, sont également impliquées dans le décès de 600000 femmes lors de complications consécutives à l'accouchement. Les principales sources alimentaires de vitamine A (rétinol) sont le lait, les œufs et le poisson. L'organisme peut également produire la vitamine A à partir de carotène présent dans les fruits jaunes et les légumes verts. Cependant l'absorption du carotène est moins bonne que celle du rétinol et la capacité de l'organisme à convertir le carotène semble relativement faible.

Cette relation permet d'estimer l'efficacité de l'approvisionnement alimentaire avec une erreur inférieure à 10 % pour plus de 96 % de la population mondiale. Autrement dit, pour assurer une EAA supérieure à 90 % \pm 10%, avec 96 % de chance de réussite, il faut assurer une DEA à l'échelle nationale supérieure ou égale à 2860 kcal.j⁻¹.hab⁻¹.

Objectifs en termes de disponibilité en protéines

L'estimation de la couverture des besoins en protéines de la population est plus délicate car on est confronté à un manque de données permettant d'accéder au déficit en protéines, données non directement disponibles. En revanche, on dispose de relations permettant de relier la consommation énergétique alimentaire au besoin en protéines en fonction des tranches d'âges. On peut en outre supposer que le rapport entre besoin et disponibilité est le même que pour l'approvisionnement énergétique alimentaire. Ces hypothèses permettent de déterminer les objectifs en termes d'apport en protéines pour une EAA recherchée.

Cependant, dans les zones où la part de l'alimentation d'origine animale est forte, le rapport entre disponibilité et besoin, qui intègre les pertes au cours du transport et du stockage, pourrait être plus élevé. En effet les contraintes de conservation et de stockage des produits d'origine animale sont plus fortes que celles qui s'appliquent sur les produits d'origine végétale.

Efficacité de l'approvisionnement alimentaire et apports en vitamines et minéraux

D'après la FAO (2003 b), le nombre de personnes souffrant de carence en micronutriments pourrait s'élever à plus de deux milliards (Kennedy et al., 2003). Parmi les 19 vitamines et minéraux considérés comme essentiels, ce sont les carences en fer, en iode et en vitamine A (rétinol) qui sont les plus préoccupantes (WHO, 2002 ; Kennedy et al., 2003).

4.1.2 Efficacité de répartition

Dans un cas idéal, pour couvrir les besoins alimentaires des populations, il faudrait assurer une DEA égale au besoin énergétique alimentaire moyen de la population. Cependant on observe en réalité qu'à l'échelle nationale, une part significative de la population peut être sous-alimentée en dépit d'une DEA moyenne supérieure au BEA moyen. C'est également le cas à l'échelle mondiale, où la DEA supérieure au BEA moyen de la population mondiale reste insuffisante pour éviter que 840 millions de personnes souffrent de sous-nutrition.

Cette observation peut s'expliquer par l'imperfection du système de répartition des denrées alimentaires. Cette imperfection peut résulter de **problèmes de répartition physique**, notamment la difficulté d'accès aux stocks de certaines zones rurales pendant les périodes de l'année où la production est faible. Elle s'explique également par **une variabilité de l'accessibilité de la nourriture** entre les différentes classes sociales de la population. Ceci se traduit pour la partie la plus riche de la population par une déconsidération de la valeur des produits alimentaires qui conduit à des gaspillages et pour une autre partie de la population par une DEA inférieure au BEA. Il en résulte que pour atteindre une EEA proche de l'unité, il faut assurer une DEA nettement supérieure au BEA de la population.

On propose de rendre compte de cet aspect pour **33 pays d'Afrique** en calculant le BEA de la population (Figure 4- 3) et en représentant l'EAA en fonction du rapport DEA/BEA. La variation des BEA entre les pays s'explique principalement par les différences de structure de la pyramide des âges entre ces pays (Figure 4- 4).

Figure 4- 3 – Estimation des besoins énergétiques alimentaires moyens pour 33 pays d’Afrique. L’estimation est établie conformément à la méthode 3 présentée dans l’Encadré 2-1

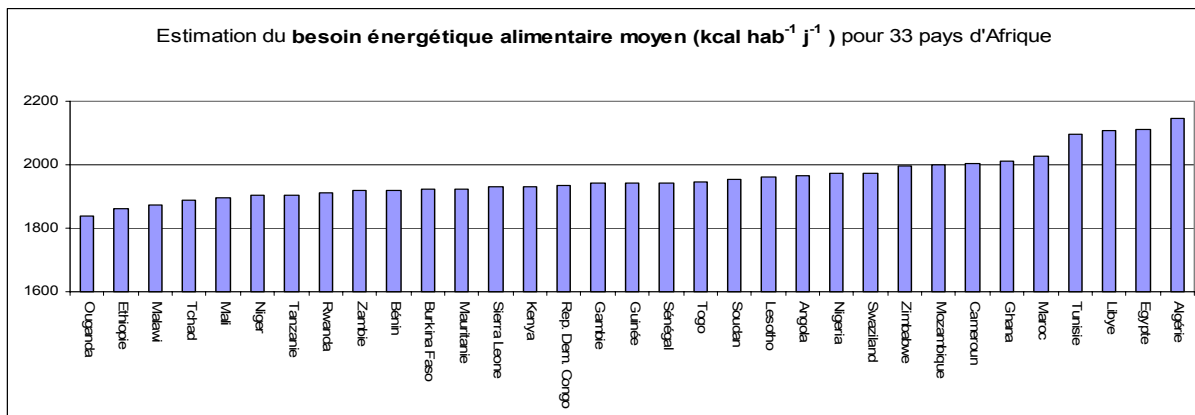
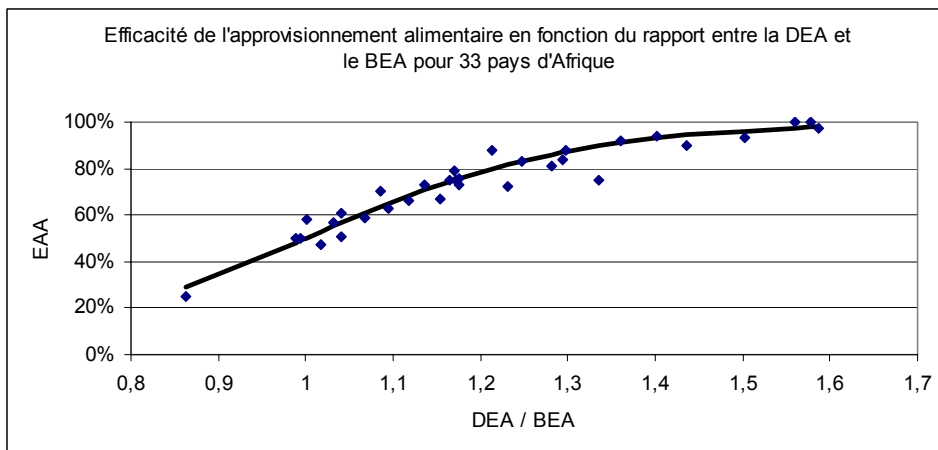


Figure 4- 4 – Relation entre l’efficacité de l’approvisionnement alimentaire (EAA) et le rapport entre la DEA et le besoin énergétique alimentaire (BEA) pour 33 pays d’Afrique. Le BEA est calculé conformément à la méthode 3 présentée dans l’Encadré 2-1. On réalise une régression de type moindres carrés afin de déterminer le paramètre C_H de la courbe sigmoïde (Résultats de la régression : C_H=0,15)



On propose d'exprimer l'EAA en fonction de DEA/BEA au moyen d'une équation de forme sigmoïdale par la relation suivante :

$$EAA (DEA / BEA) = 1 / \{1 + \exp [(1 - DEA / BEA) / C_H]\}$$

avec : DEA disponibilité énergétique alimentaire [$\text{kcal hab}^{-1} \text{j}^{-1}$], BEA besoin énergétique alimentaire [$\text{kcal hab}^{-1} \text{j}^{-1}$], et C_H un paramètre qui rend compte de l'hétérogénéité de la répartition de la DEA dans la population [SD].

En appliquant une régression de type moindres carrés pour les 33 pays considérés on obtient pour C_H une valeur de 0,15.

$$EAA (DEA / BEA) = 1 / \{1 + \exp [(1 - DEA / BEA) / 0,15]\}$$

et de fait : $DEA (EAA) = BEA [1 - 0,15 \ln (1/EAA - 1)]$

Autrement dit, **pour assurer une EAA supérieure à 85 % (moins de 15% de la population sous-nourrie), il faut assurer un rapport DEA/BEA, à l'échelle nationale, supérieur ou égal à 1,26.** L'inverse de ce coefficient permet de définir un rendement de répartition qui permet d'établir plus précisément les objectifs en termes de DEA à l'échelle nationale pour les 33 pays considérés (Encadré 4-3). On remarque, que contrairement à la valeur proposée à partir de la relation directe entre EAA et DEA, ces valeurs nationales des objectifs en termes de DEA devront être réactualisées régulièrement (disons tous les dix ans) pour tenir compte notamment de l'évolution de la pyramide des âges.

On peut considérer que la répartition est efficace à 100% lorsque l'égalité entre DEA et BEA permet d'obtenir une EAA de 100%. Lorsque C_H augmente, l'efficacité de répartition de l'approvisionnement alimentaire diminue. Les facteurs qui peuvent influencer C_H sont principalement la population et la densité de population d'un pays, l'efficacité des infrastructures de distribution, et les écarts de niveau de vie au sein du pays considéré.

4.1.3 Efficacité de production

On définit l'efficacité de production (EP) comme l'aptitude du système de production à réaliser des objectifs de production fixés.

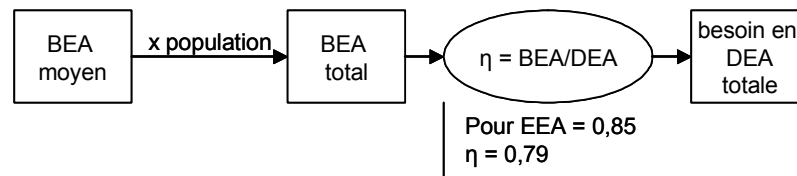
$$EP = \text{Production réelle} / \text{Objectif de production}$$

Si l'objectif recherché est la satisfaction de la demande en énergie alimentaire, la production réelle et l'objectif en termes de production sont exprimés en énergie. Cependant, on peut envisager d'utiliser le même rapport pour tout autre résultat recherché notamment l'amélioration de la disponibilité en protéines.

On propose de définir l'objectif de production comme la production à réaliser pour atteindre une DEA totale permettant de réaliser l'objectif recherché en terme d'EAA.

4.2 Durabilité physique de la mobilisation des ressources

On associe la notion de durabilité de la mobilisation d'une ressource à la durée pendant laquelle une ressource peut être exploitée sans que ne surviennent de problèmes majeurs, quantitatifs ou qualitatifs. Dans l'absolu, le mode d'exploitation d'une ressource peut être considéré comme durable si l'état de la ressource et de l'écosystème qui lui est lié reste constant pendant la phase d'exploitation de cette ressource. En quelque sorte, l'exploitation de la ressource n'affecte ni son potentiel, ni son environnement.

Encadré 4-2 - Prise en compte du rendement de répartition pour l'évaluation du besoin en DEA totale


L'étude des relations entre l'EAA, la DEA et le BEA conduit à définir un rendement de répartition au sein d'un pays. L'amélioration de ce coefficient peut constituer un objectif à part entière. Cependant, cette amélioration relève d'autres aspects que ceux liés directement à l'efficacité du système de production et de répartition. Ces aspects concernent principalement la répartition des richesses au sein d'un pays. Par ailleurs, le coefficient de répartition peut être considéré comme un paramètre donné utile pour l'évaluation des besoins en termes de DEA pour réaliser un objectif en termes de EAA.

Encadré 4-3 - Quels objectifs en termes de DEA pour satisfaire les objectifs pour 2015 du sommet mondial de l'alimentation de Rome en 1996 ?

"La Déclaration de Rome nous invite à réduire de moitié d'ici l'an 2015 le nombre de personnes souffrant de sous-alimentation chronique... Si chacun de nous fait tout ce qu'il peut, je pense que nous pourrions atteindre, voire dépasser, cet objectif que nous nous sommes fixé."

Ainsi s'exprimait, le président du sommet mondial de l'alimentation, Romano Prodi, à l'issue du sommet qui avait rassemblé plus de 10000 participants et des représentants de 185 pays. Depuis, le nombre de personnes souffrant de sous-alimentation n'a pas cessé d'augmenter. A l'échelle de la planète, la FAO estime qu'en 1999 – 2001, 842 millions de personnes étaient sous-alimentées. Ce qui revient sur une population de 6,05 milliards d'habitants (2001) à une EAA de 0,86.

Mais comment traduire les objectifs du sommet de Rome en termes de DEA ? Sur les 33 pays africains considérés, représentant 695 Mhab, plus de 160 Mhab souffrent de sous-alimentation. Pour réduire de moitié le nombre de sous-alimentés en 2015 en tenant compte de l'accroissement démographique, on estime en s'appuyant sur la relation entre EAA et (DEA/BEA) que l'ensemble des pays considérés devront atteindre une EAA supérieure à 86% (contre 76% en 2001). Pour ce faire, la DEA moyenne devra s'établir au dessus de 2700 kcal hab⁻¹ j⁻¹ et l'approvisionnement alimentaire total devra être multiplié par un facteur 1,6.

Certaines ressources présentent des taux de renouvellement quasi nuls ou très faibles et nettement inférieurs aux taux de mobilisation. Il s'agit bien sûr des ressources en énergie fossile mais aussi, de certains systèmes aquifères parfois qualifiés de ressources fossiles. Bien que les stocks disponibles dans ces ressources soient considérables, les flux de prélèvements sont nettement supérieurs aux flux de renouvellement. Dans ces cas, le mode d'exploitation n'est pas durable et la mobilisation de telle ou telle ressource dans ces conditions doit nécessairement être considérée comme transitoire. C'est-à-dire que l'exploitation limitée dans le temps permet de contribuer au développement de la société mais que la fin de la disponibilité de cette ressource doit être prise en compte dans toute action de prospective et de planification.

Au cours de la phase d'exploitation d'une ressource au taux de renouvellement faible ou non renouvelable, la maîtrise de la mobilisation de cette ressource doit permettre de développer en parallèle deux axes de connaissance et de savoir-faire. Il s'agit dans un premier temps d'anticiper l'épuisement des ressources et de prévoir quelles seront les ressources de substitution. Le plus souvent les ressources de substitution sont moins accessibles physiquement, technologiquement et financièrement. Il en découle un deuxième axe de développement : la recherche d'une efficacité accrue dans la mobilisation des ressources disponibles, en cours d'exploitation.

Cependant, la recherche de nouvelles ressources ou d'une efficacité accrue de la mobilisation des ressources disponibles présente un coût élevé que les sociétés ne sont pas toujours prêtes à payer. On remarque que la qualification d'un système de mobilisation de « durable » ou de « non durable » apparaît insuffisante. En effet, dans les nombreux exemples de mobilisation non durable des ressources par les activités humaines, on peut mettre en évidence des échéances où l'absence de solution se traduira nécessairement par une période de crise.

On définit, alors, a minima, la durabilité de tel ou tel système comme la durée restante avant l'occurrence d'une crise. La connaissance de la durabilité de tel ou tel mode d'exploitation d'une ressource dans des contextes souvent dynamiques (évolution démographique, réchauffement climatique) permettra de planifier les efforts à concéder en matière de recherche et de mise en place des infrastructures et des organisations nécessaires aux pratiques alternatives.

4.2.1 Durabilité de la mobilisation des ressources en eau

On peut considérer comme durable le mode d'exploitation d'une ressource en eau lorsque le flux prélevé dans la ressource est inférieur à la somme des flux entrants déduction faite d'un flux minimum nécessaire à la préservation de l'écosystème. La surexploitation des ressources en eau est la première cause possible de non durabilité physique d'un système de mobilisation des ressources en eau. Dans le cas des ressources de surface la surexploitation conduit à une dégradation de l'écosystème et à une diminution de la disponibilité des ressources souterraines qui lui sont liées.

Dans le cas des ressources souterraines, la surexploitation conduit à un épuisement des stocks et à une pénurie. Dans ce cas, l'épuisement progressif de la ressource s'accompagne d'une baisse du niveau des nappes et d'une augmentation du coût énergétique du prélèvement.

Encadré 4-4 - Exemple de résultat de scénarios de mobilisation des ressources : le cas de la ville de Jaïpur (Goossens et Bonnet, 2003a)

Le cas de l'approvisionnement en eau de la ville de Jaïpur représente une bonne illustration des problèmes de durabilité physique que l'on peut rencontrer dans la mobilisation des ressources en eau. L'étude d'indicateurs sensibles portant sur la ville et la zone rurale qui l'entoure a permis de mettre en évidence les problèmes suivants :

- Dans la zone urbaine :
 - la limite de la disponibilité des ressources locales est atteinte,
 - la qualité de la ressource se dégrade rapidement par infiltration d'eaux usées,
 - l'économie de l'approvisionnement en eau est mal équilibrée en raison d'une tarification trop faible et d'une facturation peu rigoureuse.
- Dans la zone rurale :
 - la concurrence d'usage existe avec l'agriculture pour l'exploitation de la ressource dans un rayon de 50 km,
 - l'irrigation est peu efficace en eau et très coûteuse en énergie.

Trois scénarios d'évolutions possibles ont été évalués dans une étude prospective dont les principaux résultats sont les suivants :

- Scénario 1 : Pas d'évolution
 - La situation n'est **pas durable** : assèchement total de la nappe en 18 ans,
 - Pendant cette période la **concentration des polluants** dans la nappe est croissante,
 - Le coût énergétique de l'irrigation par habitant augmente.
- Scénario 2 : Prélèvement et transport de l'eau stockée dans le barrage Bisalpur situé à 100 km
 - **Bénéfices** : résolution du problème de surexploitation de la ressource locale, mobilisation d'une ressource qui présente un fort potentiel en volume disponible,
 - **Coûts** : augmentation rapide du coût énergétique de l'approvisionnement en eau de la ville (inadaptée à la politique tarifaire actuelle).
- Scénario 3 : Prélèvement dans la ressource souterraine dans un rayon de 25 km puis 50 km couplé avec un programme de maîtrise de la demande en eau et en énergie de la production agricole irriguée
 - **Bénéfices** : résolution du problème de surexploitation de la ressource locale, réduction du coût énergétique de l'irrigation,
 - **Coûts** : augmentation lente du coût énergétique de l'approvisionnement en eau de la ville, dans la mesure où la ressource exploitée est plus diffuse. Prévoir un travail d'optimisation des réseaux important, la maîtrise de la demande en eau et en énergie pour l'irrigation demandant un travail organisationnel important.

Par ailleurs, l'évolution de la qualité des ressources en eau peut également constituer une source de non durabilité d'un mode d'exploitation. En effet, l'irrigation comme d'autres usages, notamment le secteur domestique, nécessite des niveaux minima de qualité de l'eau qui peuvent être remis en question suite à une dégradation de la qualité de l'eau.

Pour les ressources souterraines comme pour les ressources de surface, on peut, moyennant une bonne connaissance du contexte hydrogéologique et en faisant des hypothèses sur l'évolution des prélèvements pour les différents secteurs d'activité, réaliser des bilans prospectifs visant à prévoir l'échéance de l'épuisement des ressources (Encadré 4-4). Ces bilans prospectifs permettent d'évaluer des stratégies d'approvisionnement en eau en tenant compte des différents coûts et bénéfices des solutions techniques envisagées.

4.2.2 Durabilité de la mobilisation des sols

On ne perdra pas de vue que l'agriculture peut conduire à des dégradations plus ou moins réversibles de l'état des sols. Dans certains cas, l'irrigation peut jouer un rôle significatif dans cette dégradation. Les deux risques les plus significatifs à prendre en compte sont, d'une part, l'érosion due au ruissellement et, d'autre part, la salinisation qui peut résulter de la mise en contact des sols avec des horizons du sol présentant de fortes concentrations salines par l'intermédiaire d'une zone saturée.

4.2.3 Durabilité de la mobilisation des ressources énergétiques

La durabilité physique d'un système d'approvisionnement et de production alimentaire peut également être subordonnée à la disponibilité dans le temps de l'énergie. En effet, suivant le niveau d'intensification de la production agricole, les quantités d'énergie mobilisées pour la production agricole peuvent être significatives ce qui se traduit par un niveau élevé de dépendance énergétique du système d'approvisionnement et de production alimentaire. Lorsque les objectifs de production, à l'échelle d'un pays ou d'un territoire, impliquent des niveaux d'intensification de la production agricole élevés, l'approvisionnement en énergie du secteur agricole doit être considéré avec le même degré de priorité que les objectifs de production.

Il convient de rappeler que l'ensemble des énergies de type fossile et nucléaire, constituant la grande majorité de l'offre énergétique actuelle ne sont pas renouvelables et que pour la plupart d'entre elles (pétrole, gaz, uranium) les ressources connues ne permettront pas de satisfaire la demande pendant plus de cent ans (Figure 4- 5). Il en résulte que le **secteur de l'approvisionnement alimentaire** devra progressivement s'adapter pour **faire face à une augmentation du coût de l'énergie** et à une diminution de sa disponibilité. En outre, on peut s'interroger sur la pertinence d'investissements lourds visant au développement d'une agriculture intensive fortement consommatrice d'énergie dans des contextes où l'efficacité de l'approvisionnement alimentaire, élevée, ne les justifie pas.

Par ailleurs, il convient de tenir compte, dans les prévisions du besoin énergétique de l'agriculture irriguée, de facteurs qui conduisent à un renforcement du couplage entre la consommation d'eau et la consommation d'énergie. Ces facteurs sont notamment l'augmentation progressive de la part des ressources souterraines dans l'approvisionnement total et l'évolution des techniques d'irrigation vers des techniques sous pression.

Figure 4- 5 – Evolution du rapport entre les réserves prouvées de pétrole et la consommation annuelle à l'échelle mondiale de 1980 à 2005 (données BP, 2005)

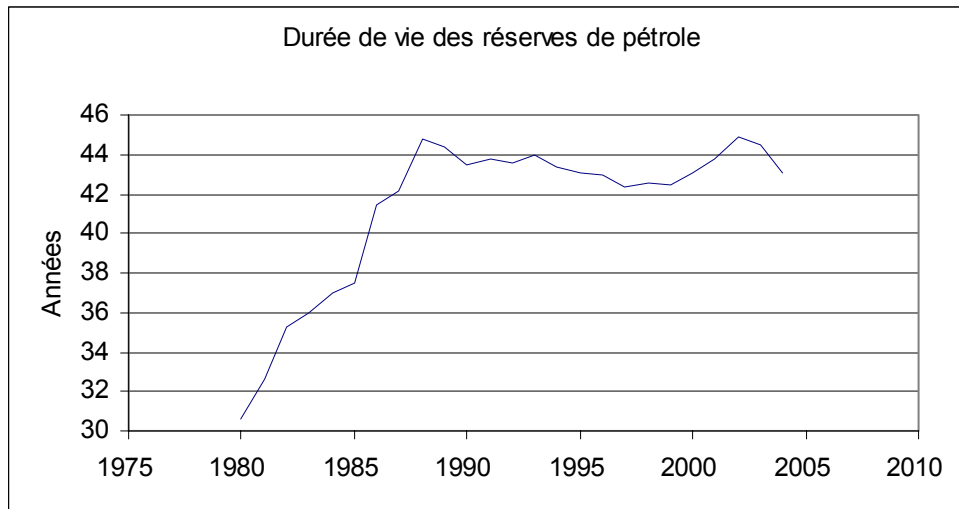


Figure 4- 6 – Evolution du nombre de chefs d'exploitation en Aquitaine entre 1992 et 2003 (Agritane, 2003)

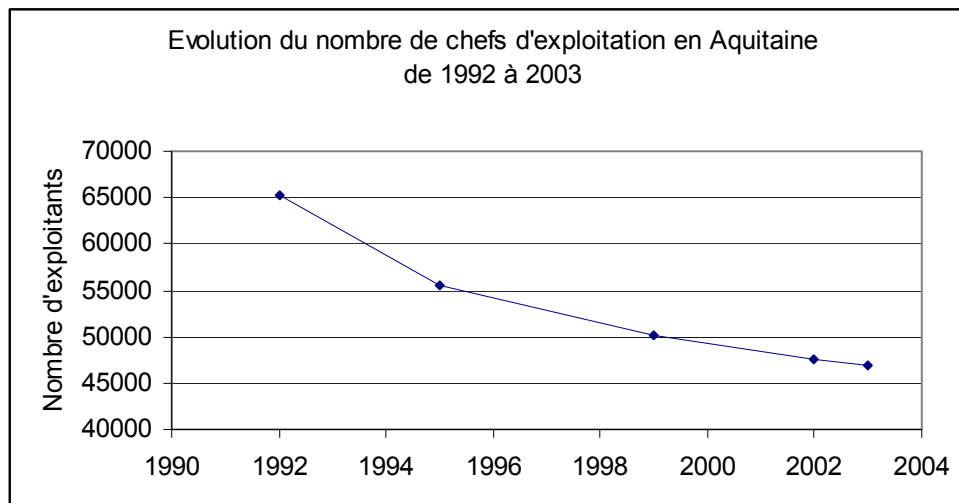


Tableau 4-1 – Evolution des prix de vente du maïs, des tomates et du lait en France au niveau des producteurs entre 1991 et 2002 (FAOSTAT) et évolution des salaires moyens en France entre 1990 et 2002 (INSEE)

	Evolution des prix de vente [€/t]			Evolution des salaires moyens [€/an]
	Maïs	Tomates	Lait	
1990				18189
1991	195	886	277	
2000	124	886	288	23340
2002	114	920	293	24308
Progression	1991 à 2002	1991 à 2002	1991 à 2002	1990 à 2002
	-42%	4%	6%	34%

4.3 Productivité de l'agriculture irriguée

En considérant d'une part les objectifs en termes de production et d'autre part les ressources disponibles compte tenu des objectifs en termes de durabilité physique, on peut définir un niveau d'intensification de la production agricole à réaliser. On remarque qu'un niveau d'intensification élevé se traduit de façon quasiment systématique par des coûts énergétiques et environnementaux élevés. Il en découle que, si un choix de niveau d'intensification de la production agricole existe à l'échelle nationale, il doit tendre vers le niveau le plus bas qui permette de satisfaire les objectifs en terme d'EAA.

Dans la pratique, d'autres critères, de type économique, interviennent fortement dans l'évolution du niveau d'intensification de la production agricole. Ce sont notamment :

- le coût des ressources humaines,
- le coût du foncier,
- le coût des infrastructures.

La nécessité d'optimiser la valorisation de telle ou telle ressource est plus ou moins sensible suivant le niveau économique des différents pays. L'optimisation se fait généralement en faveur de la ressource qui fait le plus défaut. Ainsi, une augmentation du coût des ressources humaines conduit à une augmentation des surfaces cultivées par exploitant agricole, une augmentation du coût du foncier conduit à la recherche d'activités plus productives ou dont la valeur ajoutée par unité de surface est plus forte. Ces évolutions s'accompagnent le plus souvent d'une augmentation de la consommation d'énergie et de l'impact environnemental de l'activité productive.

Des objectifs de production spécifiques à chaque ressource peuvent être définis. Ces objectifs peuvent être exprimés en terme de productivité :

- des volumes d'eau mobilisés,
- des surfaces agricoles (rendement agricole),
- de l'énergie mobilisée (inverse de l'intensité énergétique),
- des ressources humaines (production par actif agricole),
- des capitaux mobilisés.

PARTIE 3 : PROPOSITION D'OUTILS POUR L'ÉVALUATION

5 Des outils pour quoi faire ?

6 Outil d'évaluation des contextes nationaux

6.1 Caractérisation de quatre contextes et hiérarchisation des objectifs

- 6.1.1 C 1 : Augmentation de l'irrigation non indispensable et niveau de prélèvement faible
- 6.1.2 C 2 : Augmentation de l'irrigation non indispensable et niveau de prélèvement élevé
- 6.1.3 C 3 : Augmentation de l'irrigation nécessaire et niveau de prélèvement faible
- 6.1.4 C 4 : Augmentation de l'irrigation nécessaire mais niveau de prélèvement élevé

6.2 Description des critères de classement

- 6.2.1 Le développement de l'irrigation doit-il être considéré comme prioritaire ?
- 6.2.2 Le niveau de prélèvement des ressources en eau est-il préoccupant ?

6.3 Elaboration et utilisation des fiches pays

- 6.3.1 Lecture des fiches pays
- 6.3.2 Elaboration des fiches pays : hypothèses, sources et calculs
- 6.3.3 Exploitation des fiches pays

7 Un programme local d'audit pour l'amélioration des performances

7.1 Préparation du programme

- 7.1.1 Qui sont les porteurs potentiels d'un projet de diagnostic des exploitations agricoles ?
- 7.1.2 Sur quelle zone porte le projet ?
- 7.1.3 Pré-définition des objectifs du programme

7.2 Montage

- 7.2.1 Identifier les acteurs concernés par le programme
- 7.2.2 Monter le programme local
- 7.2.3 Evaluer les moyens et les ressources pour la réalisation du programme

7.3 Réalisation

- 7.3.1 Etude préparatoire sur le premier groupe (1), large, d'exploitations cibles
- 7.3.2 Diagnostic approfondi sur le second groupe (2), restreint, d'exploitations cibles

7.4 Restitution et valorisation des résultats

- 7.4.1 Restituer les résultats
- 7.4.2 Recueillir les avis
- 7.4.3 Valider et travailler les actions les plus fréquemment recommandées
- 7.4.4 Mise en place du suivi et de l'accompagnement

8 Démarche de diagnostic eau – énergie de l'exploitation

8.1 L'étude préparatoire, une étude pour structurer la collecte des données

- 8.1.1 Etats des lieux de la zone
- 8.1.2 Structure des exploitations et des systèmes d'irrigation

8.2 La collecte des données pour le diagnostic approfondi

- 8.2.1 Les données à collecter pour le diagnostic approfondi
- 8.2.2 Préparation et réalisation de l'enquête

8.3 Analyse des performances

- 8.3.1 Indicateurs généraux
- 8.3.2 Indicateurs de performance technique « eau-énergie »
- 8.3.3 Analyse des performances énergétiques des systèmes d'irrigation

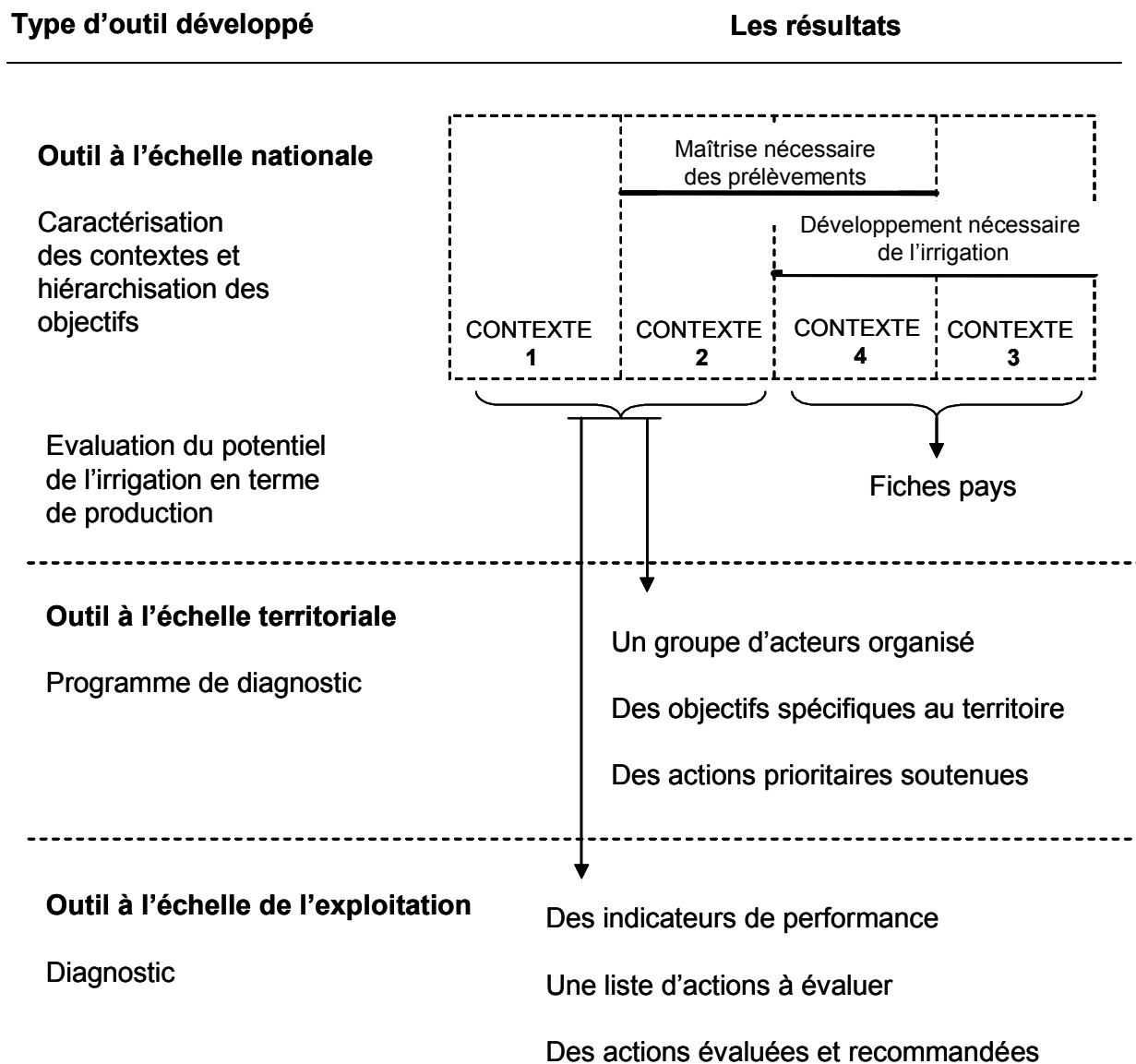
8.4 Liste des actions à examiner

- 8.4.1 Actions sur les infrastructures
- 8.4.2 Actions sur le pilotage
- 8.4.3 Actions sur les assolements
- 8.4.4 Actions combinées entre infrastructure, pilotage et assolements
- 8.4.5 Actions spécifiques engagées et envisagées par l'exploitant

8.5 Conditions de réalisation et évaluation des actions

- 8.5.1 Conditions pour la mise en œuvre des actions
- 8.5.2 Coûts et bénéfices associés aux actions
- 8.5.2 Adéquation avec les directions stratégiques privilégiées par l'exploitant

Figure 5- 1 - Description générale de l'organisation des outils proposés de l'échelle nationale à l'échelle de l'exploitation



5 *Des outils pour quoi faire ?*

L'ambition de cette troisième partie est de détailler les outils pour **évaluer les performances, les actions techniques envisageables et les propositions qui émanent de l'organisation existante**. Les caractéristiques de ces outils doivent garantir leur capacité d'intégration au sein même de l'organisation étudiée et la faisabilité technique de leur mise en œuvre.

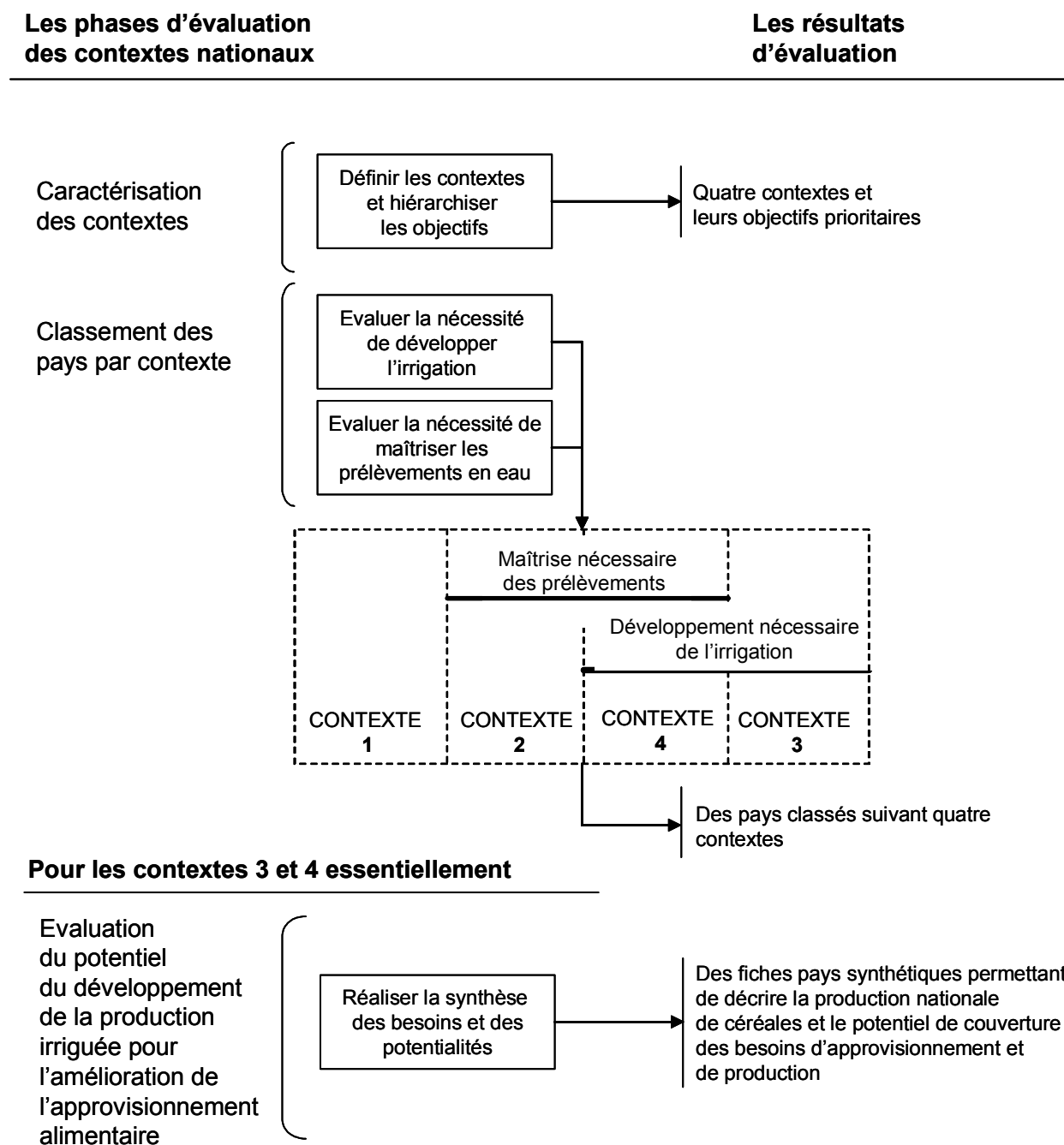
Les outils ont pour but d'identifier **des actions adaptées aux cas étudiés et de les hiérarchiser**. Les actions proposées doivent être décrites avec un niveau de précision opérationnel. Autrement dit, la description faite des actions avec la participation des acteurs doit être suffisamment détaillée pour que les acteurs sachent comment les réaliser. Nous proposons une approche formalisée autour de trois outils d'évaluation pour identifier, décrire et classer des actions. Cependant, vu la complexité des systèmes étudiés (plusieurs niveaux d'acteurs, et plusieurs jeux d'intérêts) cette approche, bien que formalisée, doit présenter la **souplesse nécessaire à l'étude de cas concrets** présentant une grande diversité. Ainsi, pour chaque phase de la recherche et de la mise en œuvre d'actions, aux échelles de territoires et d'exploitations, il convient de réserver une part significative de discussion avec les acteurs en dehors de l'aspect formel de l'application de tel ou tel outil d'évaluation.

On propose de développer **un premier outil à l'échelle nationale** pour évaluer l'état de l'approvisionnement alimentaire et les potentialités en termes de ressource en sol et en eau pour la production agricole. A cette échelle, on cherche, en privilégiant le traitement d'informations statistiques, à établir une hiérarchie entre les objectifs d'approvisionnement alimentaire, de gestion et de durabilité de mobilisation des ressources en eau et en énergie et de rentabilité de l'agriculture irriguée. Pour établir cette hiérarchie dans les objectifs, on propose de définir quatre contextes qui rendent compte de la nécessité d'irriguer et de la nécessité de gérer la ressource. Dans les contextes où le besoin de production alimentaire est significatif, l'évaluation porte sur le potentiel de production envisageable compte tenu des ressources en eau et en sol.

Le **deuxième outil** décrit les synergies à mettre en œuvre dans le cadre d'un programme de diagnostic visant à identifier et soutenir des actions au niveau d'exploitations agricoles représentatives **d'un territoire homogène**. Il concerne notamment l'identification des acteurs et des moyens à mettre en œuvre pour ce faire. Un des intérêts majeurs du travail à l'échelle territoriale proposé au travers de cet outil est la possibilité d'intégrer et de valoriser, d'une part, des expériences et des résultats issus d'un ensemble d'exploitations et, d'autre part, des compétences des différentes catégories d'acteurs qui interviennent à cette échelle.

A l'échelle de l'exploitation, où se prend une part importante des décisions qui ont une influence sur les performances « eau-énergie », il convient de décrire précisément les performances des techniques et des pratiques mises en œuvre. Pour ce faire, le **troisième outil** décrit les principales étapes du diagnostic « eau-énergie » de l'exploitation irriguée. Cet outil a été conçu en interaction avec les enquêtes menées en Lot-et-Garonne et dans la région du Gharb. Il permet d'identifier les points de performance à améliorer et de décrire les actions adaptées à la structure et aux contraintes de l'exploitation qui peuvent être mises en œuvre pour atteindre des objectifs en termes de production, et de coûts de production.

Figure 6- 1 - Description générale de l'outil d'évaluation des contextes à l'échelle nationale



6 Outil d'évaluation des contextes nationaux

6.1 Caractérisation de quatre contextes et hiérarchisation des objectifs

Nous avons vu dans la deuxième partie que les paramètres qui conditionnent la faisabilité et l'efficacité de l'agriculture irriguée sont nombreux. On remarque par ailleurs qu'une partie de ces paramètres varient de façon considérable d'un pays ou d'un territoire à un autre, de sorte que les besoins et les potentialités de l'agriculture irriguée sont très sensibles à la nature des contextes. Les contextes peuvent être classés en catégories établies sur la base des nécessités de développement les plus préoccupantes en termes de production agricole irriguée et de gestion des ressources en eau.

On se propose de décrire ci-dessous quatre types de contextes. Nous n'avons pas la prétention de décrire ainsi l'ensemble de la diversité des situations nationales existantes. Il s'agit plutôt de montrer la nécessité d'une hiérarchisation et d'une organisation des objectifs de développement au sein d'un pays en fonction des éléments de contexte qui y caractérisent la production agricole irriguée.

6.1.1 Contexte 1 - Une augmentation de l'irrigation n'est pas indispensable et le niveau de prélèvement des ressources est faible

Dans ce type de contexte, le niveau de prélèvement des ressources est faible. Par ailleurs, le développement de l'irrigation n'y est pas un objectif prioritaire, soit parce que le niveau de production atteint est satisfaisant (premier cas), soit parce que le besoin d'irrigation n'est pas le principal facteur limitant de la production agricole (deuxième cas).

Dans le premier cas, l'agriculture devient une activité productive comme une autre. La production s'oriente vers la recherche de bénéfices maximaux compte tenu des potentialités du marché et de la politique agricole du pays considéré. C'est le cas de la production agricole irriguée dans de nombreux pays industrialisés. La lecture économique de l'agriculture irriguée est particulièrement adaptée. La capacité des différentes cultures et des différents schémas d'exploitation agricole à générer de la valeur ajoutée dans le respect des contraintes imposées par la société, notamment en matière d'environnement, devient le principal critère d'optimisation. Il en résulte que les études technico-économiques de l'irrigation s'inscrivent très bien dans une tendance visant à rationaliser les intrants dans le but d'optimiser les marges de bénéfice.

Dans le deuxième cas, où le niveau de production agricole est encore insuffisant, on considère que, compte tenu des conditions climatiques, le développement de l'irrigation n'est pas nécessairement l'intervention prioritaire à mener pour améliorer la production agricole. Dans ce cas, où la satisfaction de la demande alimentaire reste un objectif prioritaire, il convient d'analyser l'ensemble des contraintes agronomiques susceptibles de limiter la production et d'agir sur celles qui sont jugées à la fois les plus pertinentes et les moins coûteuses.

6.1.2 Contexte 2 - Une augmentation de l'irrigation n'est pas indispensable et le niveau de prélèvement des ressources est élevé

D'autres pays qui ont bénéficié de progrès significatifs du point de vue agricole et économique présentent un niveau d'approvisionnement alimentaire satisfaisant et un taux de mobilisation des ressources en eau préoccupant.

Tableau 6-1 - Répartition de 81 pays, représentant 4,5 Ghab, entre les quatre contextes décrits et valeurs des indicateurs utilisés pour établir la répartition. Les pays traités sont ceux pour lesquels l'ensemble des données est accessible (année 2002, bases de données : FAOSTAT, AQUASTAT, CLIMWAT)

	Pluvio /ET0	PEC/ RDT	PREL./ BEC	RES.	DEA		Pluvio /ET0	PEC/ RDT	PREL./ BEC	RES.	DEA
Contexte 1 - population concernée : 1227,8 Mhab											
Une augmentation de l'irrigation n'est pas indispensable et le niveau de prélèvement est faible											
Argentine	0,42	3,3	6,54	0,04	3177	Iles Maurice	1,02	7,8	0,00	0,18	3168
Belize	0,77	2,5	1,78	0,01	2889	Indonésie	1,00	4,2	1,39	0,03	2931
Brésil	0,73	2,8	2,70	0,01	3012	Jamaïque	0,92	1,2	0,01	0,11	2708
Cameroun	0,77	1,7	0,72	0,00	2260	Libéria	1,16	0,9	0,31	0,00	2089
Chili	0,81	5,2	1,51	0,03	2858	Malaysia	1,20	3,2	0,60	0,03	2947
Colombie	1,14	3,4	0,84	0,00	2567	Népal	0,67	2,2	1,37	0,17	2264
Costa Rica	0,81	0,8	0,02	0,06	2761	Nigéria	0,53	1,0	1,23	0,02	2833
Côte d'Ivoire	1,23	3,7	0,45	0,01	2582	Ouganda	0,75	1,7	1,35	0,01	2238
Cuba	0,78	1,3	1,06	0,14	2490	Panama	1,11	2,1	0,87	0,01	2496
Equateur	0,73	2,3	1,60	0,04	2679	Paraguay	0,67	2,0	3,14	0,00	2588
El Salvador	0,79	2,5	0,86	0,04	2463	Péru	0,54	3,4	1,10	0,01	2621
France	0,78	7,5	9,92	0,16	3575	Philippines	0,93	2,7	1,46	0,13	2357
Gabon	0,94	1,3	0,17	0,00	2487	Portugal	0,87	2,9	1,13	0,11	3768
Grèce	0,49	3,7	2,87	0,12	3689	Sierra Leone	1,00	1,2	0,43	0,00	2017
Guatemala	0,97	1,7	0,61	0,01	2331	Suriname	0,98	3,9	2,77	0,00	2604
Guinée	0,78	1,4	1,03	0,00	2133	Thailand	0,65	2,7	3,67	0,09	2411
Guyane	1,02	3,8	4,52	0,01	2569	Trinidad et Tobago	0,90	2,8	0,05	0,08	2703
Haïti	0,89	0,8	0,32	0,08	1978	Turquie	0,49	2,2	2,00	0,17	3469
Honduras	0,75	1,3	0,48	0,02	2396						
Contexte 2 - population concernée : 1767,1 Mhab											
Une augmentation de l'irrigation n'est pas indispensable et le niveau de prélèvement est élevé											
Afrique du Sud	0,35	2,8	1,56	0,32	2805	Japon	1,00	6,1	0,84	0,22	2782
Algérie	0,19	1,1	0,29	0,41	2966	Kuwait	0,05	3,0	0,03	30,95	3167
Arabie Saoudite	0,06	4,0	0,82	11,46	2953	Liban	0,52	2,5	0,31	0,36	3256
Arménie	0,79	3,4	1,19	0,27	2167	Mauritanie	0,09	1,0	0,23	0,24	2703
Chine	0,49	4,9	1,84	0,20	3044	Maroc	0,30	1,1	0,71	0,43	3010
Egypte	0,04	7,2	1,17	1,28	3323	Rwanda	1,02	1,0	0,85	0,23	2011
Espagne	0,48	3,2	5,40	0,32	3353	Sri Lanka	0,80	3,4	0,93	0,22	2411
Italie	0,61	5,0	2,28	0,22	3629	Tunisie	0,23	1,2	0,28	0,60	3388
Contexte 3 - population concernée : 298,1 Mhab											
Le développement de l'irrigation est nécessaire et le niveau de prélèvement est faible											
Angola	0,53	0,5	0,45	0,00	1873	Madagascar	0,68	2,0	1,11	0,08	1994
Bénin	0,56	0,9	1,19	0,01	2489	Malawi	0,63	1,0	0,76	0,07	2164
Bolivie	0,57	1,6	0,99	0,00	2237	Mali	0,26	0,8	0,90	0,02	2314
Botswana	0,29	0,3	0,14	0,01	2288	Mozambique	0,50	0,9	0,70	0,00	1939
Burkina Faso	0,35	0,9	1,03	0,04	2376	Namibia	0,16	0,4	0,31	0,02	2096
Burundi	0,62	1,3	0,89	0,03	1628	Nicaragua	0,53	1,7	1,14	0,01	2314
Ethiopie	0,69	1,4	0,64	0,03	1803	Niger	0,19	0,4	0,98	0,02	2064
Gambia	0,40	1,0	0,59	0,00	2598	Sénégal	0,29	0,7	0,42	0,05	2307
Ghana	0,62	1,3	1,13	0,01	2590	Tchad	0,27	0,7	0,91	0,01	2206
Guinée-Bissau	0,63	1,1	0,60	0,00	2245	Togo	0,60	1,0	1,05	0,01	2528
Kénya	0,51	1,5	0,65	0,09	1886	Zambie	0,52	1,4	0,34	0,02	1934
Lésotho	0,54	1,1	0,43	0,02	2300	Zimbabwe	0,40	0,5	0,34	0,09	2076
Contexte 4 - population concernée : 1242,3 Mhab											
Une augmentation de l'irrigation serait nécessaire mais le niveau de prélèvement est élevé											
Inde	0,49	2,3	1,18	0,32	2417	Soudan	0,29	0,5	0,71	0,32	2360
Pakistan	0,14	2,3	1,05	0,92	2462	Yémen	0,21	0,9	0,14	1,26	2002

C'est le cas de nombreux pays du pourtour méditerranéen dans lesquels on observe une augmentation régulière des besoins alimentaires et des besoins en eau liés à la croissance démographique.

Dans ces contextes, les priorités s'expriment en termes de durabilité de mobilisation des ressources en eau et de durabilité du mode d'approvisionnement alimentaire. En outre, la pression démographique est telle que des conflits d'usages peuvent se produire, notamment entre le secteur domestique et le secteur agricole.

Pour tendre vers la durabilité dans l'utilisation des ressources, il convient dans ce contexte de stabiliser, voire de réduire, la demande en eau tout en assurant l'approvisionnement en eau et en nourriture des populations. Il s'agit le plus souvent d'améliorer l'efficacité en eau par des actions sur les techniques et les pratiques de l'irrigation et par l'optimisation des choix en matière de culture et d'assolements. Dans cet objectif, les exploitants agricoles et les acteurs du développement agricole doivent inscrire leur démarche dans une amélioration constante de l'organisation et de la technicité.

6.1.3 Contexte 3 - Une augmentation de l'irrigation est nécessaire et le niveau de prélèvement des ressources est faible

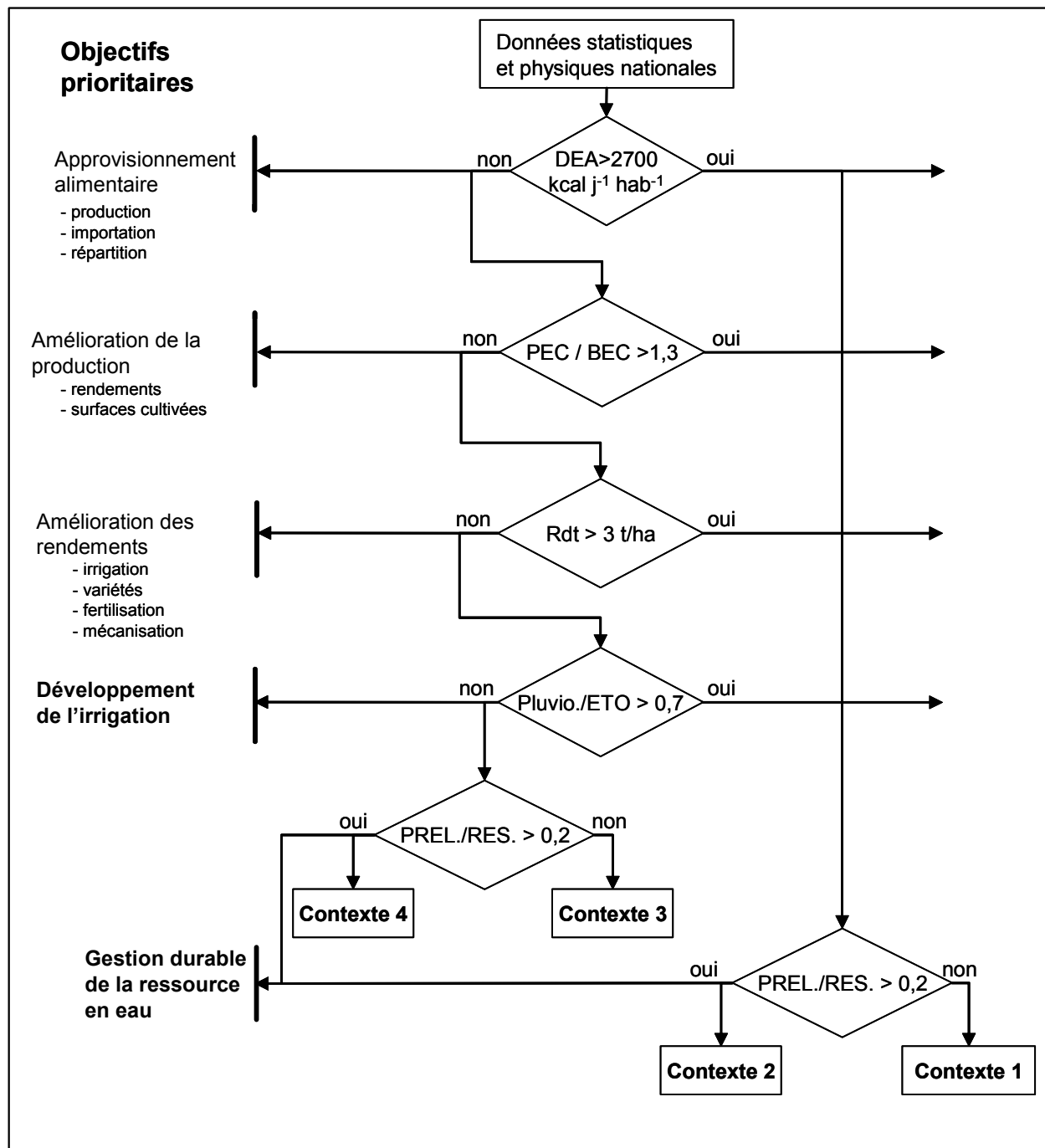
Certains pays, principalement en Afrique, sont caractérisés par une situation alimentaire préoccupante ou grave alors que le potentiel des ressources en eau et en sol permettrait de couvrir une part significative, voire la totalité, des besoins. Dans ces pays, où l'objectif de satisfaction de la demande alimentaire doit être considéré comme prioritaire, la disponibilité des ressources en eau et en sol n'est pas le facteur limitant. Cependant, les rendements agricoles restent faibles.

L'Afrique est la région du monde qui présente le plus grand nombre de pays dans cette situation. En Afrique sub-saharienne, la FAO (FAO, 2003 a) estime que **seulement 2% des ressources en eaux renouvelables sont mobilisées pour l'agriculture**. Dans cette même zone les grandes infrastructures de mobilisation et de distribution des eaux de surface sont très peu développées.

Parallèlement on observe **une tendance marquée au ralentissement du financement des grands projets publics d'aménagement**. Les principales raisons évoquées sont la diminution de la rentabilité de tels projets, liée, d'une part, aux coûts croissants des aménagements, et d'autre part, à la baisse des prix des produits de l'agriculture. Ce désengagement des grands groupes de financement internationaux conduit à l'impossibilité économique de valoriser une grande partie des ressources de surface par des grands projets d'aménagement tel que ceux développés, dans certains pays, dont le Maroc et l'Inde, entre les années 1950 et les années 1980.

Dans le discours, ce désengagement se traduit par la mise en avant des potentialités de la petite irrigation et des ressources en eaux souterraines. Nous tenons cependant à attirer l'attention sur le fait que **le développement de la petite irrigation doit faire face à de nombreux freins**. Ce sont notamment **l'absence de moyens des exploitants agricoles** des zones pauvres pour réaliser les investissements nécessaires à la réalisation d'un puits, à l'achat d'une pompe et de l'énergie pour pomper, mais également **le manque de technicité et la difficulté d'accès aux crédits**.

Figure 6- 2 – Méthode de classification utilisée pour répartir les pays entre les quatre contextes décrits



Dans ce type de contexte où la réalisation de l'objectif prioritaire d'approvisionnement alimentaire est souvent freinée par des contraintes économiques, les instances politiques à l'échelle nationale et internationale ont un rôle décisif à jouer pour débloquer les moyens financiers nécessaires au développement de l'agriculture et de l'irrigation.

6.1.4 Contexte 4 - Une augmentation de l'irrigation serait nécessaire mais le niveau de prélèvement des ressources est élevé

Dans ce type de contexte où la difficulté pour satisfaire la demande alimentaire est accentuée par une contrainte forte sur la disponibilité des ressources en eau, les orientations possibles du point de vue du développement agricole sont plus restreintes que dans le contexte 3.

L'efficacité dans la valorisation productive des ressources disponibles et des ressources alternatives, réutilisation des eaux usées, collecte et stockage des eaux de pluie notamment, sont des objectifs à rechercher en priorité. Il convient en outre, dans un souci de pertinence des interventions, de classer les stratégies disponibles en fonction de leur coût de mise en œuvre et de leur portée. L'autre voie d'approvisionnement qui consiste à compléter la production par des importations est fortement limitée par le niveau économique toujours faible de ces pays.

6.2 Description des critères de classement

Afin de déterminer dans quel type de contexte décrit ci-dessus on peut classer les différents pays on propose d'appliquer la méthode décrite dans la Figure 6- 2. Pour ce faire, il faut pouvoir répondre aux deux questions suivantes :

6.2.1 Le développement de l'irrigation doit-il être considéré comme prioritaire ?

Il convient tout d'abord, pour répondre à cette question, de déterminer si un développement de l'irrigation est nécessaire à la réalisation des objectifs de production. Dans un premier temps, on estime que l'approvisionnement alimentaire est une priorité nationale dès lors que la DEA est inférieure à 2700 kcal j⁻¹ hab⁻¹.

On considère ensuite que si le rapport de la production et du besoin en céréales, tout deux exprimés en énergie alimentaire par individu moyen, est inférieur à 1,3 (approvisionnement, pertes, semences, ...), il est nécessaire d'améliorer les moyens de production. La production en énergie alimentaire d'origine céréalière est calculée, à partir des données extraites de la base statistique FAOSTAT, en faisant le produit du contenu énergétique moyen en céréales par la production. Le besoin en énergie alimentaire d'origine céréalière BEC est estimé par la relation suivante :

$$BEC = Pop \times CEC \times C_{\text{sous-nutrition}}$$

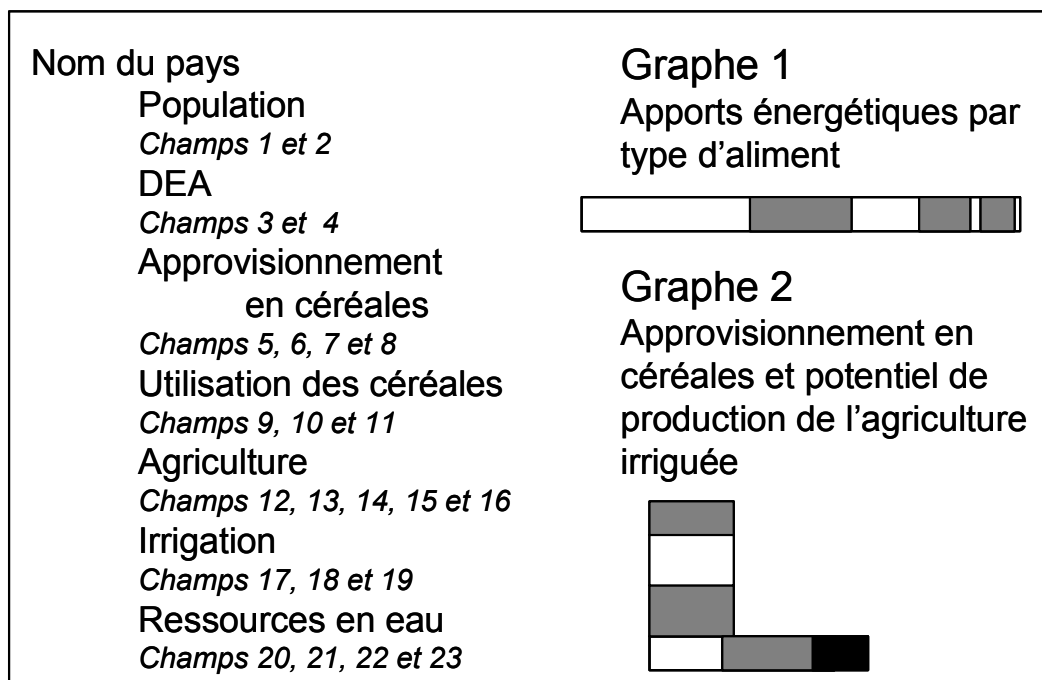
avec : Pop population du pays considéré, CEC consommation d'énergie alimentaire d'origine céréalière par habitant et par an, $C_{\text{sous-nutrition}}$ coefficient de correction pour rendre compte du besoin d'approvisionnement supplémentaire en cas de DEA faible (=1 si DEA > 2700, = 2700/DEA si DEA < 2700).

Il s'agit enfin de déterminer si l'irrigation peut contribuer à une amélioration de la production. On estime que l'irrigation est un facteur d'amélioration de la production prioritaire lorsque les rendements de production sont faibles (rendement agricole < 3 t/ha) et lorsque le rapport entre la pluviométrie et l'évapotranspiration est faible (pluviométrie annuelle / ET0 annuelle < 0,7).

Tableau 6-2 – Description qualitative du niveau de contrainte sur la mobilisation des ressources en eau en fonction du niveau de prélèvement des ressources

Niveau de prélèvement des ressources	Qualification du niveau de mobilisation des ressources	Populations concernées (1000 hab)	Nombre de pays concernés	Exemples de pays du groupe
40% > Prel. / Res. > 100%	Non durable	155200	8	Arabie saoudite, Egypte, Libye
100 % > Prel. / Res. > 40%	Très limité (localement non durable)	399800	14	Irak, Maroc, Tunisie
40% > Prel. / Res. > 20 %	Limité (localement non durable)	2903300	21	Chine, Espagne, Inde, Soudan
20 % > Prel. / Res. > 10%	Durable (localement limité)	852200	16	Etats-Unis, France, Portugal
10% > Prel. / Res.	Limite peu sensible	1840800	87	Argentine, Brésil, Sénégal

Figure 6- 3– Description schématique de la structure des fiches pays



6.2.2 Le niveau de prélèvement des ressources en eau est-il préoccupant ?

On cherche ensuite à déterminer si la disponibilité de la ressource en eau doit être considéré comme un facteur limitant. Pour cela, on détermine le **niveau de prélèvement** que l'on définit comme la part des ressources naturelles prélevées pour l'ensemble des secteurs d'activité.

Il est relativement délicat de définir le niveau de prélèvement critique à partir duquel la gestion quantitative de la ressource en eau doit être considérée comme une priorité à l'échelle nationale. On propose, pour ce faire, de se baser sur les connaissances dont on dispose sur la situation de certains pays et d'établir une description qualitative du niveau de contrainte associé à la mobilisation des ressources. Les pays sont classés en cinq groupes en fonction du niveau de prélèvement conformément au Tableau 6-2. En complément à la lecture du tableau on remarque que, dans le cas de grand pays, par exemple l'Inde, le niveau de prélèvement moyen des ressources peut masquer des hétérogénéités considérables entre les bassins versants. On propose de retenir qu'à l'échelle nationale, la recherche de durabilité dans la gestion des ressources en eau est prioritaire lorsque le niveau de prélèvement est supérieur à 20%.

6.3 *Elaboration et utilisation des fiches pays*

L'objet de ce paragraphe est de mettre en relation les besoins énergétiques alimentaires de pays avec les modalités d'approvisionnement et les potentialités de production de céréales par l'agriculture irriguée. L'approvisionnement et les besoins alimentaires des populations sont considérés du seul point de vue énergétique et les apports nécessaires en protéines, en vitamines et en minéraux ne sont pas abordés ici. Il s'agit de mettre en évidence un potentiel de production par les ressources naturelles et l'opportunité que représente ce potentiel pour couvrir partiellement ou totalement les besoins alimentaires d'un pays donné.

Pour ce faire, on propose d'utiliser des fiches pays utilisant les données statistiques facilement accessibles. Par ailleurs, dans la mesure où ces fiches traitent essentiellement des questions d'alimentation et de potentiel de production, nous avons choisi de les élaborer pour **36 pays africains** (Tableau 6-3) dont on sait par ailleurs qu'ils ont, le plus souvent, à faire face à de graves problèmes d'alimentation.

6.3.1 **Lecture des fiches pays**

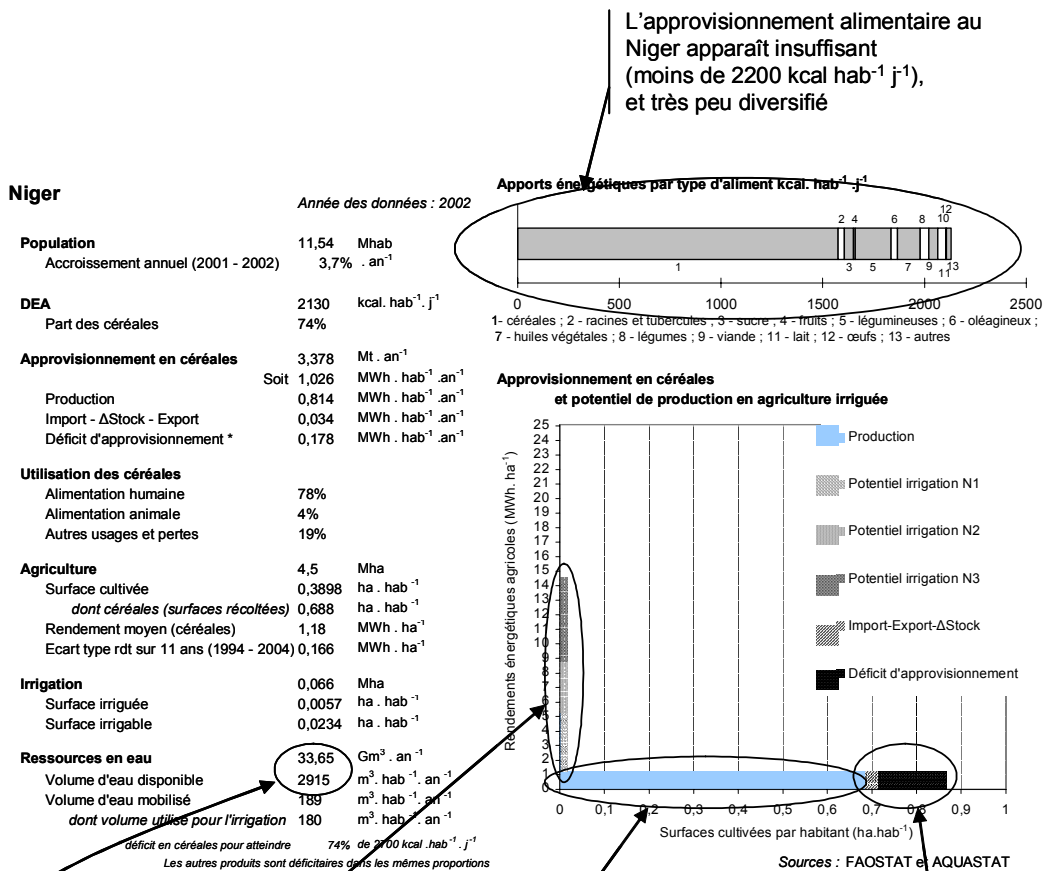
Les fiches pays regroupent des informations synthétiques sur l'alimentation, l'approvisionnement, la production et le potentiel de production de céréales. Elles sont structurées conformément à la Figure 6- 3 autour de deux graphes et d'indicateurs généraux du pays.

Les deux graphes permettent une lecture visuelle rapide de la répartition de la disponibilité alimentaire entre les principaux aliments et de la répartition de l'approvisionnement et du potentiel d'approvisionnement par habitant. Pour une lecture plus approfondie la partie de gauche fournit les principales valeurs à l'échelle des pays. L'Encadré 6-1 donne un exemple des informations qui peuvent être extraites à l'occasion d'une lecture rapide des fiches pays.

Tableau 6-3 - Liste des 36 fiches pays disponibles en annexe

1 Algérie	13 Kenya	25 Ouganda
2 Angola	14 Lesotho	26 Rwanda
3 Bénin	15 Libéria	27 Sénégal
4 Burkina Faso	16 Libye	28 Sierra Leone
5 Cameroun	17 Malawi	29 Souaziland
6 Congo Rep. Dem.	18 Mali	30 Soudan
7 Egypte	19 Maroc	31 Tanzanie
8 Ethiopie	20 Mauritanie	32 Tchad
9 Gambie	21 Mozambique	33 Togo
10 Ghana	22 Namibie	34 Tunisie
11 Guinée	23 Niger	35 Zambie
12 Guinée-Bissau	24 Nigéria	36 Zimbabwe

Encadré 6-1 – Exemple de lecture rapide de la fiche pays du Niger



L'approvisionnement alimentaire au Niger apparaît insuffisant (moins de 2200 kcal hab⁻¹ j⁻¹), et très peu diversifié

d'après les données concernant la surface irrigable de AQUASTAT, le potentiel de production lié à l'irrigation est très faible

Cependant, le pays dispose de ressources en eau importantes et peu mobilisées

Une étude plus approfondie des ressources en eau mobilisables pour l'irrigation semble justifiée

Les rendements de production sont très faibles et les surfaces récoltées par habitant sont importantes

Pour satisfaire le déficit d'approvisionnement, il faudrait récolter 0,15 ha supplémentaire par habitant

La part des importations dans l'approvisionnement total est faible

Pour l'approche rapide de l'approvisionnement alimentaire, dont l'approvisionnement en céréales d'un pays, le lecteur pourra utiliser les deux graphes et répondre aux questions suivantes :

- l'approvisionnement alimentaire total par habitant est-il suffisant (supérieur à 2700 kcal hab⁻¹ j⁻¹) ? (Grappe 1)
- quelle part représente les céréales dans l'apport énergétique alimentaire moyen ? (Grappe 1)
- comment se répartit l'approvisionnement en céréales (production, imports, exports, stock) ? (Grappe 2)
- les rendements moyens de la production céréalière sont-ils satisfaisants ? (Grappe 2)
- le potentiel de production lié à l'irrigation permettrait-il de couvrir une part significative de l'approvisionnement ? (Grappe 2)

Cet ensemble de questions/réponses permet de déterminer si oui ou non les conditions d'approvisionnement et de production de céréales doivent être améliorées et si l'irrigation peut contribuer de façon significative à cette amélioration.

L'approche rapide peut également être complétée par une approche chiffrée intégrant un plus grand nombre de paramètres en utilisant la partie gauche de la fiche. Les valeurs présentées permettent notamment de répondre aux questions suivantes :

- l'accroissement démographique du pays nécessite-t-il d'être pris en considération comme un déterminant de l'approvisionnement alimentaire à moyen terme ?
- la part des usages non alimentaires des céréales est-elle significative (> 40%) ?
- les variations interannuelles des rendements en céréales sont-elles significatives (> 30 %) et pénalisantes pour l'approvisionnement ?
- y a-t-il une bonne cohérence entre volumes des ressources en eau disponibles par habitant et surfaces irrigables par habitant ?

Cette lecture complémentaire permet de préciser l'évaluation des besoins en céréales en y ajoutant des éléments utiles pour la projection dans le temps. Elle permet également de déterminer si la ressource en eau constitue un facteur limitant de première importance du potentiel d'irrigation.

6.3.2 Elaboration des fiches : hypothèses, sources et calculs

On propose de détailler ci-dessous les 23 champs présentés dans les fiches pays et de décrire le contenu et le mode d'élaboration des deux graphes.

Les données brutes utilisées sont issues des bases de données de la FAO (FAOSTAT et AQUASTAT). Le contenu des différents champs peut-être décrit de la façon suivante :

Champ 1 : population (2002) - Pop₂₀₀₂ - [Mhab]

Champ 2 : accroissement démographique (entre 2001 et 2002) – Ac_{demo} - [%]
$$Ac_{demo} = |(Pop_{2002}) - (Pop_{2001})| / (Pop_{2001}) . 100$$

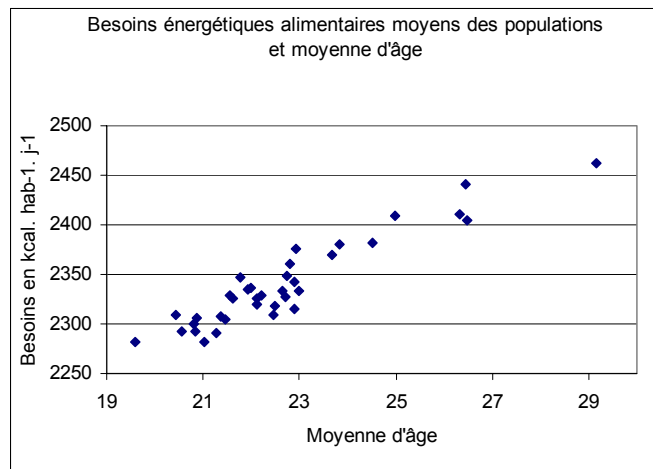
Champ 3 : Disponibilité Energétique Alimentaire (2002) – DEA – [kcal. hab⁻¹. j⁻¹]

Champ 4 : part des céréales dans la DEA (2002) – %EA_{céréales} – [%]
$$\% EA_{céréales} = EA_{céréales} / DEA . 100$$

Encadré 6-2 - Pourquoi fixer la valeur seuil de la DEA à 2700 kcal hab⁻¹ j⁻¹ ?

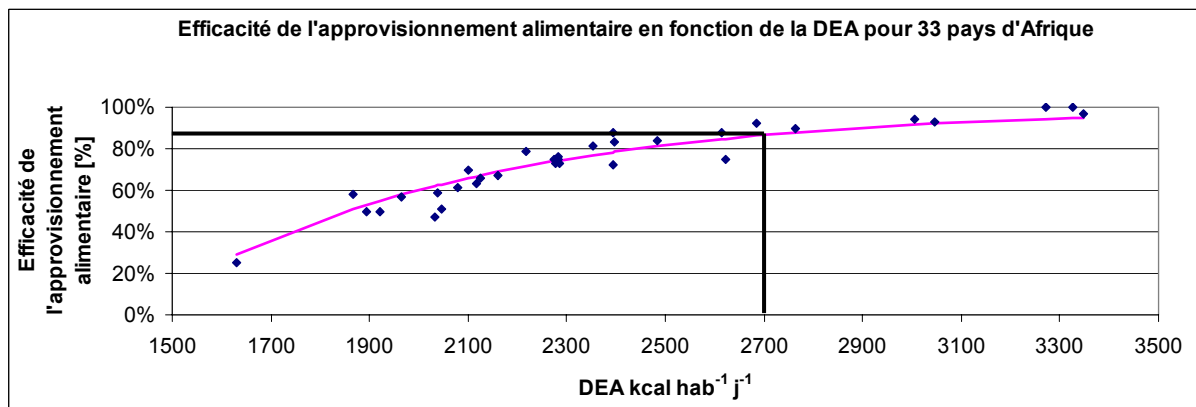
On réalise la Figure 6- 4 en se basant sur la méthode d'évaluation des besoins énergétiques alimentaires moyens d'une population présentée dans l'Encadré 2-1. On observe, sur les 33 pays étudiés, entre les pays, une variabilité des besoins moyens d'environ 170 kcal. j⁻¹ pour une moyenne des besoins individuels d'environ 2350 kcal hab⁻¹ j⁻¹.

Figure 6- 4 – Besoins énergétiques quotidiens individuels moyens et âge moyen de la population pour 33 pays d'Afrique – Source : pyramide des âges (2002) (U.S. Bureau of the Census – International Data Base)



Cependant, ces besoins énergétiques aux échelles individuelles ne prennent pas en compte les pertes liées au stockage, à la commercialisation, et aux déchets dans les ménages, pertes difficiles à évaluer. On peut en revanche proposer des objectifs en termes de DEA en fixant des objectifs de diminution du taux de malnutrition. D'après Collomb (1996) citant des données de la FAO, une DEA de 2700 kcal hab⁻¹ j⁻¹ à l'échelle nationale permettrait de limiter à 10% la part de la population sous-alimentée. D'après la figure ci-dessous, une DEA de 2700 kcal hab⁻¹ j⁻¹ ne permettrait de ne limiter la part des sous-nourris dans une population qu'à 15 % (efficacité de l'approvisionnement alimentaire de 85%).

Figure 6- 5 – Efficacité de l'approvisionnement alimentaire et DEA dans le continent africain



On rappelle en outre les résultats de l'Encadré 4-3 d'après lesquels, pour réaliser l'objectif fixé par le sommet mondial de l'alimentation à l'horizon 2015 d'une réduction de moitié de la population des sous-nourris, la DEA en Afrique devra s'établir au dessus de 2700 kcal hab⁻¹ j⁻¹.

$EA_{\text{céréales}}$ Energie alimentaire contenue dans les céréales dédiées à l'alimentation humaine [$\text{kcal hab}^{-1} \text{j}^{-1}$]

Champ 5 : approvisionnement en céréales total (2002) – $Appro_{\text{céréales}}$ – [Mt. an^{-1}]

Champ 6 : production d'énergie alimentaire d'origine céréalière par habitant (2002)

– $PE_{\text{céréales}}$ – [$\text{MWh hab}^{-1} \text{an}^{-1}$]

$$PE_{\text{céréales}} = CE_{\text{céréales produites}} \cdot Prod_{\text{céréales}} / (Pop_{2002})$$

$CE_{\text{céréales produites}}$ contenu énergétique moyen des céréales produites : moyenne pondérée des pouvoirs calorifiques des principales céréales produites [MWh t^{-1}]

$Prod_{\text{céréales}}$ production totale de céréales [M t]

Champ 7 : échange d'énergie alimentaire d'origine céréalière par habitant (2002)

– $EcE_{\text{céréales}}$ – [$\text{MWh hab}^{-1} \text{an}^{-1}$]

$$EcE_{\text{céréales}} = CE_{\text{céréales échangées}} \cdot Ec_{\text{céréales}} / (Pop_{2002})$$

$CE_{\text{céréales échangées}}$ contenu énergétique moyen des céréales échangées : moyenne pondérée des pouvoirs calorifiques des principales céréales échangées [MWh t^{-1}]

$Ec_{\text{céréales}}$ échange total de céréales : bilan des imports exports et de la mobilisation du stock national [M t]

Champ 8 : déficit d'approvisionnement en céréales (2002) : approvisionnement énergétique en céréales manquant pour atteindre une DEA de $2700 \text{ kcal hab}^{-1} \text{j}^{-1}$ en conservant les habitudes alimentaires du pays – $Def Appro_{\text{céréales}}$ – [$\text{MWh hab}^{-1} \text{an}^{-1}$]

$$Def Appro_{\text{céréales}} = (2700 - DEA) \cdot \%EA_{\text{céréales}} \cdot 4,18 / (3600 \cdot 1000)$$

Le choix de l'objectif en termes de DEA à $2700 \text{ kcal j}^{-1} \text{hab}^{-1}$ est discuté dans l'Encadré 6-2.

Champs 9, 10 et 11 : utilisation des céréales

- part des céréales utilisées pour l'alimentation humaine (2002) [%]

- part des céréales utilisées pour l'alimentation animale (2002) [%]

- part des céréales perdues notamment au cours du transport, du conditionnement et du stockage ou utilisées pour d'autres usages notamment comme semences (2002) [%]

Champs 12, 13 et 14 : surface totale cultivée (2002) [Mha]

- surface cultivée par habitant (2002) [ha hab^{-1}]

- surface de céréales cultivée par habitant (2002) – $Sc_{\text{céréales}}$ – [ha hab^{-1}]

Champ 15 : rendement de la culture de céréales (2002) – $rdt_{\text{céréales}}$ – [$\text{MWh ha}^{-1} \text{an}^{-1}$]

$$rdt_{\text{céréales}} = PE_{\text{céréales}} / Sc_{\text{céréales}}$$

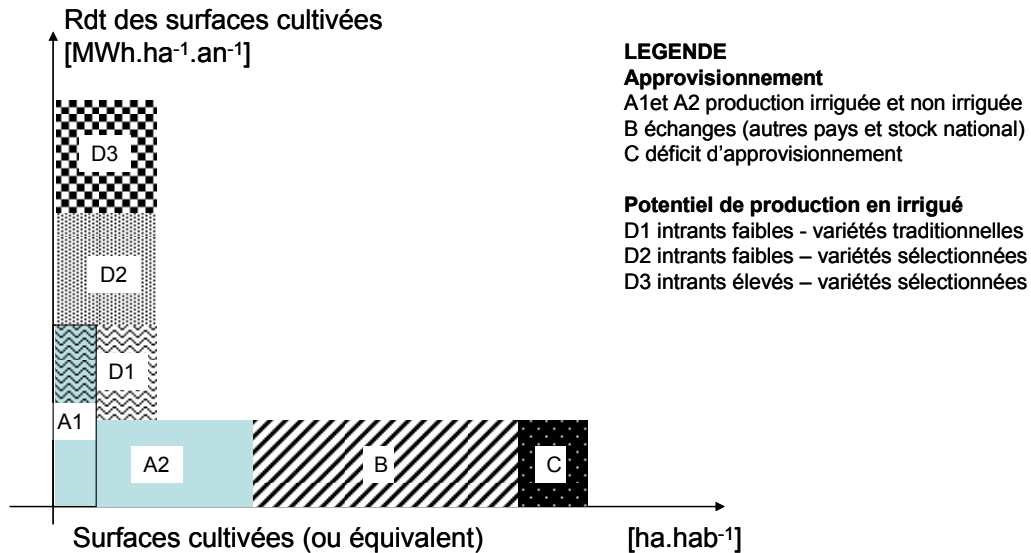
Champ 16 : Ecart type du rendement sur 11 ans (1994 – 2004) [$\text{MWh ha}^{-1} \text{an}^{-1}$]

Champs 17, 18 et 19 : surface irriguée (2002) [Mha]

- surface irriguée par habitant [ha. hab^{-1}]

- surface irrigable par habitant [ha. hab^{-1}]

Encadré 6-3 – Note explicative de la structure du graphe 2 – Dans ce graphe les aires ont une signification : elles correspondent à des flux d'énergie alimentaire par habitant produits, importés, manquants et productibles



La **production totale de céréales** (surfaces grisées) est obtenue d'après le champ 6 (PE_{céréales}) présenté précédemment. Elle se décompose en production irriguée **A1** et production non irriguée **A2**. La surface de céréales irriguée par habitant est obtenue d'après l'inventaire des cultures irriguées (Aquistat). Les valeurs des rendements de production des surfaces irriguées ne sont pas accessibles et doivent être estimées. Par hypothèse et à l'exception du cas de l'Egypte où les rendements sont d'environ 7 t. ha⁻¹.an⁻¹, le rendement des céréales irriguées est pris égal au rendement correspondant au niveau d'intensification le plus bas (1,8 t ha⁻¹ an⁻¹). Cette hypothèse, utilisée pour le continent africain, s'appuie sur l'observation de la mobilisation encore faible d'engrais et de variétés sélectionnées. Le rendement des surfaces non irriguées est déduit à partir de la production totale, de la production irriguée et des surfaces cultivées irriguées et non irriguées.

L'approvisionnement par habitant en énergie alimentaire issue des **échanges de céréales avec les autres pays et avec le stock national** est représenté par le **rectangle B hachuré**. L'aire du rectangle est égale à l'énergie calculée dans le champ 7 (EcE_{céréales}). Les dimensions sont données par la surface par habitant qu'il faudrait cultiver avec les rendements de l'agriculture non irriguée pour produire l'énergie correspondant aux échanges mentionnés.

Le **déficit d'approvisionnement** en céréales par rapport au seuil de 2700 kcal. hab⁻¹. j⁻¹ est représenté lorsqu'il est non nul par le **rectangle C noir**. L'aire du rectangle est égale à l'énergie calculée dans le champ 8 (Def Appro_{céréales}). Les dimensions sont données par la surface par habitant qu'il faudrait cultiver avec les rendements de l'agriculture non irriguée pour produire l'énergie correspondant au déficit d'approvisionnement.

Le **potentiel de production de céréales en agriculture irriguée** est représenté pour trois niveaux d'intensification par trois rectangles **D1 (vaguelettes)**, **D2 (moucheté)**, **D3 (damier)**. Les rendements des trois niveaux N1, N2 et N3 d'intensification sont établis d'après les indications de la figure ci-dessous.

L'évaluation de la surface irrigable d'un pays est établie par AQUASTAT et prend en considération des recoupements entre la disponibilité des ressources, les terres cultivables, et les besoins climatiques des cultures. Dans certains cas, le potentiel d'irrigation pourrait être discuté notamment en considérant les ressources en eau disponibles.

Champs 20 – 23 : ressources en eau : volume total disponible (2002) [$Gm^3 \text{ an}^{-1}$]
 - volume d'eau disponible par habitant (2002) [$m^3 \text{ hab}^{-1} \text{ an}^{-1}$]
 - volume d'eau mobilisé par habitant (2002) [$m^3 \text{ hab}^{-1} \text{ an}^{-1}$]
 - volume d'eau mobilisé par habitant pour l'agriculture (2002) [$m^3 \text{ hab}^{-1} \text{ an}^{-1}$]

Graph 1 : Apports énergétiques par type d'aliment (2002) [$kcal \text{ hab}^{-1} \text{ j}^{-1}$]

Ce graphe permet d'apprécier rapidement la répartition de la ration énergétique quotidienne d'un habitant moyen du pays considéré entre les principaux groupes d'aliments. Sur le graphe, les 13 groupes d'aliments apparaissent toujours dans le même ordre :

- | | |
|---------------------------|-------------------|
| 1 - céréales | 8 - légumes |
| 2 - racines et tubercules | 9 - viande |
| 3 - sucre | 10 - lait |
| 4 - fruits | 11 - œufs |
| 5 - légumineuses | 12 - pêche en mer |
| 6 - oléagineux | 13 - autres |
| 7 - huiles végétales | |

Graph 2 : Approvisionnement et potentiel de production de céréales en agriculture irriguée

Ce graphe est une synthèse des données concernant l'approvisionnement énergétique d'origine céréalière et le potentiel de production de céréales pour trois niveaux d'intensification en agriculture irriguée. La note explicative présentée dans l'Encadré 6-3 permet de repérer les correspondances pour les différentes cases et la façon dont elles ont été calculées.

En abscisse sont représentées les surfaces cultivées par habitant et en ordonnées les rendements agricoles convertis en énergie par hectare de sorte que les aires représentées sur le graphe correspondent à des énergies par habitant. Les données représentées sont :

- la production de céréales par habitant en agriculture non irriguée,
- la production par habitant en agriculture irriguée,
- le bilan des échanges de céréales (import + mobilisation du stock-export) par habitant,
- le déficit d'approvisionnement en céréales pour atteindre une DEA de $2700 \text{ kcal. hab}^{-1} \text{ j}^{-1}$ en gardant constante la part des céréales dans l'alimentation,
- le potentiel de production de céréales de l'agriculture irriguée pour trois niveaux d'intensification de l'agriculture.

Les rendements effectifs et potentiels exprimés en MWh par hectare sont déterminés pour chaque pays, en réalisant la moyenne du contenu énergétique des céréales par unité de masse que l'on multiplie par les rendements par unité de surface. Si on considère une surface agricole produisant 2 tonnes de blé par hectare et par an et que le contenu énergétique du blé s'établit à $2900 \text{ kcal kg}^{-1}$, le rendement énergétique se calcule de la façon suivante :

$$\text{rdt}_{\text{céréales}} = 2900 \times 2000 \times 4,18 / (3600 \cdot 1000) = 6,7 \text{ MWh ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$$

Figure 6- 6 – Les trois niveaux d'intensification de la production agricole retenus pour l'évaluation du potentiel de production de céréales en irrigué d'après Smith et al. (2001)

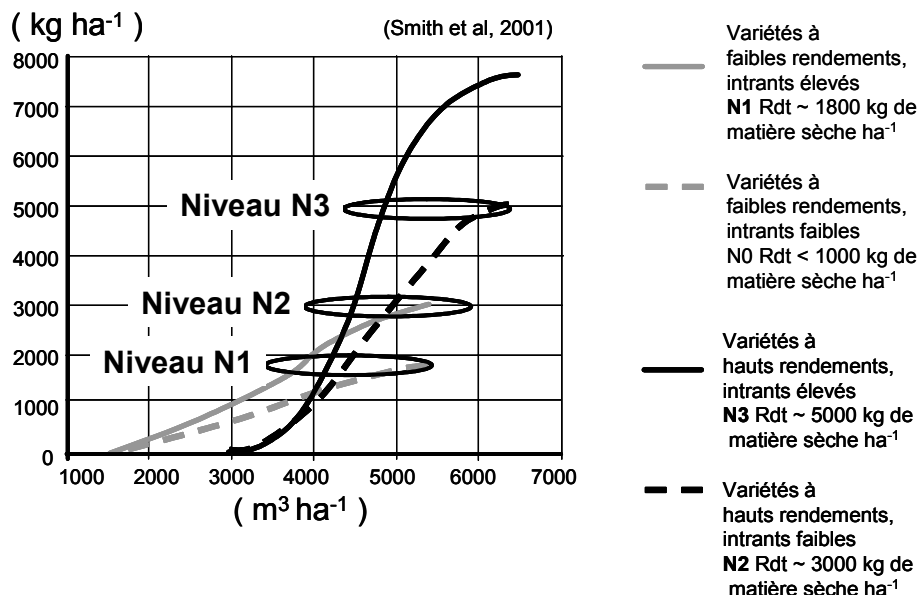


Tableau 6-4 – Evaluation du potentiel de couverture des déficits d'approvisionnement et de production de céréales pour 36 pays d'Afrique et en fonction de 3 niveaux d'intensification de la production agricole. Ces résultats se basent sur les fiches présentées en annexe.

Niveaux d'intensification	Taux de couverture potentiel du déficit d'approvisionnement alimentaire			Taux de couverture potentiel du déficit de production alimentaire			Taux de couverture potentiel du déficit d'approvisionnement alimentaire			Taux de couverture potentiel du déficit de production alimentaire			
	N 1	N 2	N 3	N 1	N 2	N 3	N 1	N 2	N 3	N 1	N 2	N 3	
Algérie	pas de déficit d'appro.			0,00	0,01	0,02	Maroc	pas de déficit d'appro.			0,05	0,25	0,58
Angola	12,86	21,49	35,89	6,84	11,43	19,08	Mauritanie	pas de déficit d'appro.			0,52	0,96	1,70
Bénin	4,13	7,16	12,21	0,93	1,62	2,76	Mozambique	4,10	6,92	11,61	3,58	6,04	10,14
Burkina Faso	0,67	1,21	2,11	1,67	3,03	5,28	Namibie	0,69	1,21	2,09	0,14	0,25	0,42
Cameroun	0,49	0,86	1,49	0,35	0,62	1,06	Niger	0,42	0,76	1,33	2,22	3,99	6,94
Congo Rép. Dém.	1,09	1,82	3,03	2,13	3,55	5,91	Nigéria	pas de déficit d'appro.			0,50	0,85	1,45
Egypte	pas de déficit d'appro.			0,62	1,03	0,53	Ouganda	0,36	0,64	1,10	0,42	0,74	1,28
Ethiopie	1,00	1,68	2,81	2,74	4,60	7,70	Rwanda	0,45	0,79	1,34	1,17	2,02	3,44
Gambie	1,94	3,29	5,55	0,51	0,87	1,46	Sénégal	1,24	2,23	3,87	0,29	0,51	0,89
Ghana	42,51	71,48	119,75	2,68	4,51	7,56	Sierra Leone	3,54	6,01	10,14	2,07	3,52	5,94
Guinée	2,53	4,89	8,83	0,82	1,58	2,86	Souaziland	3,61	6,02	10,03	0,39	0,66	1,10
Guinée-Bissau	4,82	8,04	13,40	3,21	5,35	8,92	Soudan	1,46	3,31	6,39	1,06	2,42	4,67
Kénya	0,24	0,43	0,74	0,24	0,43	0,74	Tanzanie	0,45	0,78	1,34	0,92	1,61	2,77
Lesotho	1,71	2,84	4,74	0,05	0,09	0,14	Tchad	2,79	4,65	7,75	11,88	19,81	33,01
Libéria	3,92	6,53	10,88	1,74	2,90	4,83	Togo	1,54	2,59	4,35	0,93	1,56	2,61
Libye	pas de déficit d'appro.			0,04	0,11	0,23	Tunisie	pas de déficit d'appro.			0,01	0,03	0,07
Malawi	0,33	0,59	1,02	0,23	0,40	0,70	Zambie	0,89	1,53	2,59	0,55	0,95	1,60
Mali	0,53	1,41	2,87	0,95	2,53	5,17	Zimbabwe	0,28	0,60	1,14	0,16	0,35	0,66

La part des surfaces irrigables pour la production de céréales est déterminée d'après les règles suivantes :

- Si le déficit alimentaire est nul, alors, la part des surfaces irrigables qui peut être dédiée aux céréales est estimée comme égale à la part des surfaces effectivement irriguées en céréales.
- En revanche, si le déficit alimentaire est non nul, on attribue arbitrairement une priorité aux céréales en considérant que la part des surfaces irrigables qui peut être dédiée aux céréales est égale à la part de l'apport énergétique des céréales dans la DEA.

Le produit de la part des surfaces irrigables qui peuvent être dédiées à la production de céréales ainsi obtenue et de la surface irrigable totale permet d'obtenir la valeur de la surface irrigable en céréales.

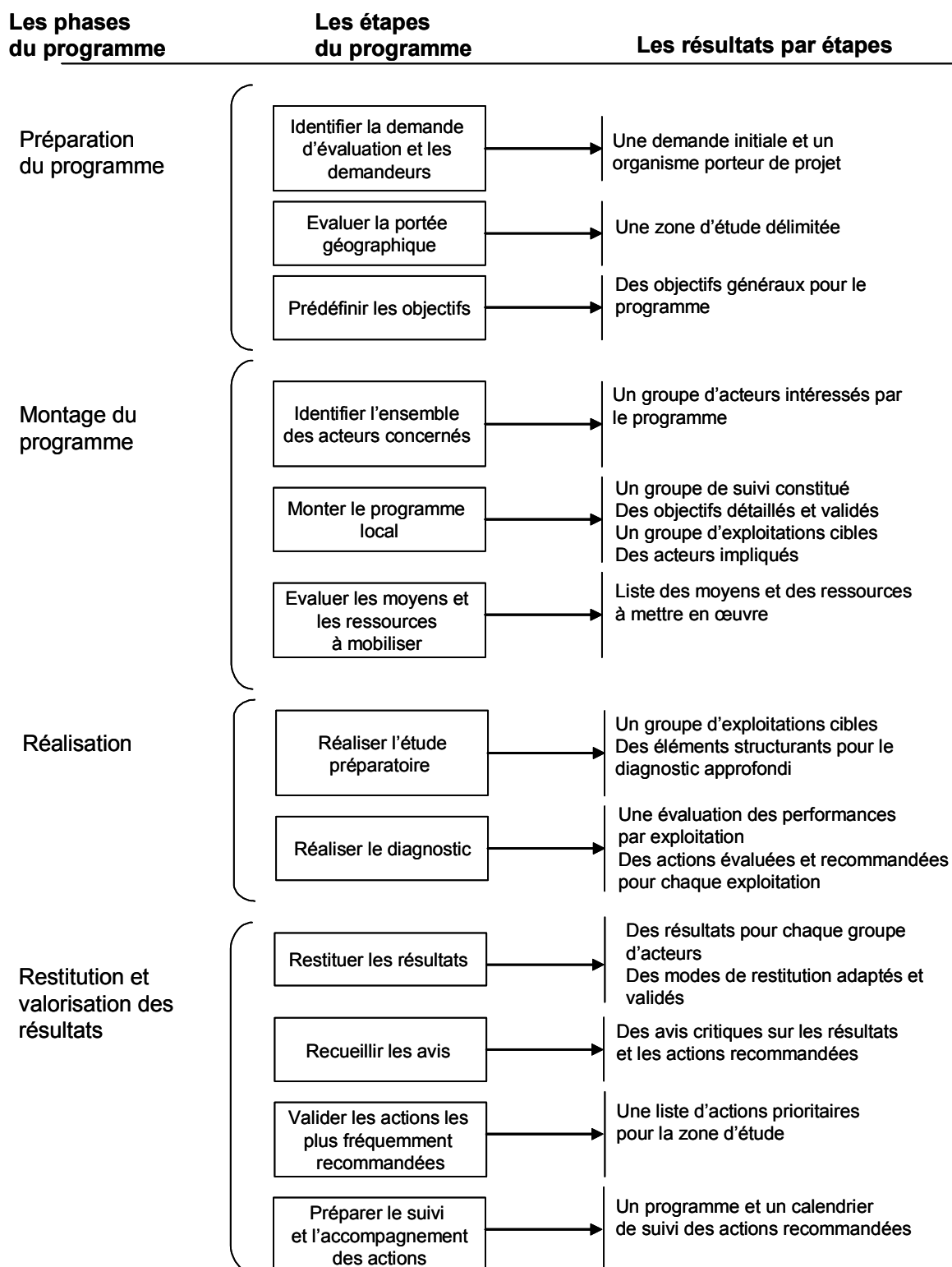
Les trois niveaux de rendements potentiels sont obtenus en considérant trois niveaux d'intensification de la production céréalière conformément aux résultats de Smith et al. (2001) présentés dans la Figure 6- 6. Ces trois niveaux d'intensification correspondent à des rendements de 1,8, 3 et 5 tonnes par hectare. Pour obtenir un rendement énergétique équivalent, ces rendements sont ensuite multipliés par le contenu énergétique moyen des céréales dans le pays considéré. A titre indicatif, on obtient pour les trois niveaux d'intensification des rendements de 6, 10 et 18 MWh par hectare.

6.3.3 Exploitation des fiches pays

Les fiches pays peuvent être exploitées comme des outils d'aide à la décision au cours de phases préparatoires de l'élaboration des stratégies de développement agricole. La possibilité d'évaluer rapidement les potentiels de production qui pourraient être réalisés par un développement de l'irrigation constitue le principal point fort de ces fiches synthétiques.

On peut déduire des fiches pays des informations concernant le potentiel de couverture des déficits d'approvisionnement et de production de céréales en fonction des différents niveaux d'intensification de la production agricole irriguée envisagés. Le déficit d'approvisionnement en céréales est défini comme la quantité d'énergie alimentaire d'origine céréalière qu'il faudrait produire ou importer pour assurer une DEA de $2700 \text{ kcal j}^{-1} \text{ hab}^{-1}$ en respectant la part des céréales dans l'approvisionnement alimentaire du pays considéré. On définit le déficit de production comme égal aux importations. Une évaluation de ces taux de couverture potentiels est proposée pour les trois niveaux d'intensification de la production définis dans la Figure 6- 6.

Figure 7- 1– Synoptique du programme de diagnostic



7 Un programme local d'audit pour améliorer les performances

7.1 Préparation du programme

L'occasion et la décision de mettre en œuvre un programme de diagnostic constituent le premier pas. Ce premier pas peut venir en réponse à une sollicitation de la société civile, des exploitants, ou s'intégrer dans la mission des structures d'animation du monde agricole. Suite à la décision de réaliser un programme de diagnostic, les porteurs de projet doivent définir de façon préliminaire les principaux éléments en termes de portée du diagnostic.

7.1.1 Qui sont les porteurs potentiels d'un projet de diagnostic eau – énergie des exploitations agricoles ?

Quel que soit l'objectif du programme de diagnostic, il doit être porté avec **une volonté politique forte** d'un ou plusieurs acteurs qui font autorité à l'échelle du projet et dans le monde agricole. Dans la mesure où ce sont les exploitants agricoles qui sont à la fois les principaux bénéficiaires des diagnostics et les principaux fournisseurs d'information pour la réalisation du diagnostic, il est indispensable que **les porteurs du projet soient reconnus par les exploitants** et qu'il n'y ait pas de conflit d'intérêt entre ces deux catégories d'acteurs.

Les associations professionnelles structurées et représentatives, les chambres d'agriculture ou les organismes équivalents, les départements de développement agricole sont particulièrement adaptés pour porter ce type de projet. En effet, l'amélioration des performances des exploitations est souvent une mission explicite de ces structures.

Dans le cas où les capacités d'intervention de ces structures ne sont pas suffisantes, la phase initiale du projet peut être plus complexe. Trois possibilités se présentent alors : (i) « commencer petit » avec la structure la mieux adaptée en misant sur son renforcement au fil des réalisations, (ii) impliquer une autre structure (autorité locale), (iii) renforcer lorsque c'est possible la structure la mieux adaptée par une dotation en ressources humaines et/ou financières.

7.1.2 Sur quelle zone porte le projet ?

Ce sont les moyens disponibles en termes de capacité d'intervention (ressources humaines, financières et infrastructures) et le niveau d'acceptation des objectifs qui permettent de définir l'ampleur de la zone d'étude. De plus, si on cherche à obtenir des résultats lisibles et exploitables, il est raisonnable de rechercher une bonne homogénéité du contexte de réalisation des diagnostics en termes tant de structures des exploitations que de contraintes extérieures auxquelles elles sont soumises. Une zone peut être choisie parce qu'elle est le lieu d'une problématique spécifique bien identifiée et formalisée. Dans ce cas la problématique de zone identifiée sera déterminante dans le choix du fil rouge du programme de diagnostic.

7.1.3 Pré-définition des objectifs du programme

Les objectifs du programme peuvent être structurés autour d'une problématique de zone existante.

Encadré 7-1 - Eléments concernant la structure des associations potentiellement porteuses de projets dans le Gharb

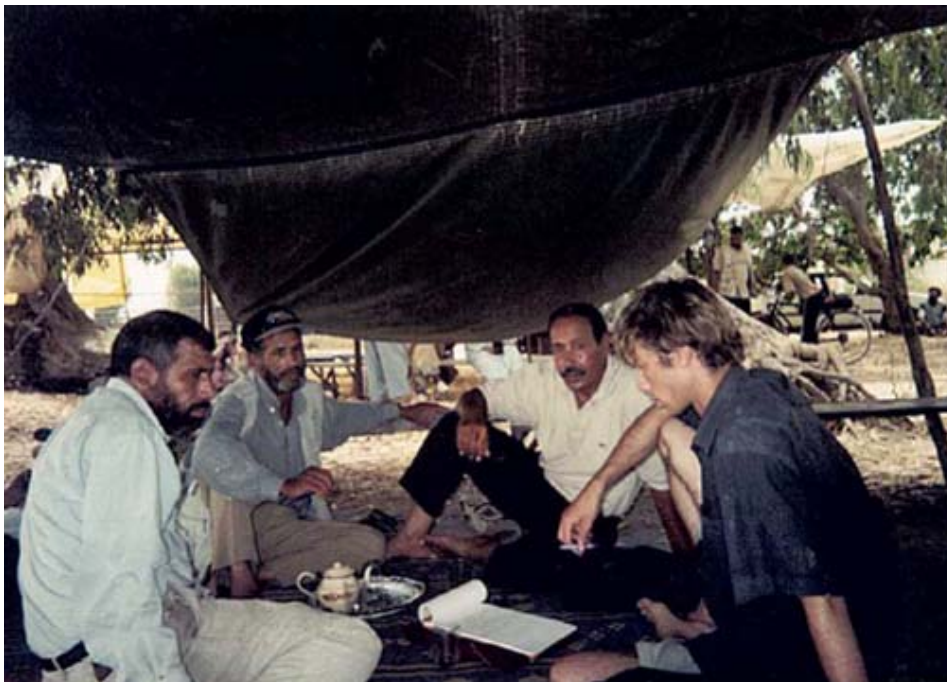
Des associations d'exploitants irrigants se constituent actuellement dans le Gharb. Elles regroupent notamment des producteurs de betteraves ou de canne à sucre et ont pour objet le soutien technique aux producteurs. Ces associations pourraient à moyen terme représenter des interlocuteurs privilégiés pour le déclenchement de programmes de diagnostic et d'amélioration des pratiques de l'irrigation. Cependant, ces associations, dont la création est encouragée par l'Etat dans le cadre de la démarche de responsabilisation des exploitants pour la prise en charge progressive d'une partie de la gestion des infrastructures de distribution d'eau, ne fonctionnent pas dans des conditions optimales.

Au cours des ateliers du séminaire Wademed et au cours des discussions engagées avec les agriculteurs, plusieurs freins à la réalisation de projets techniques et économiques ont été mis en évidence. Premièrement, l'implication des membres des associations est très faible. Certains agriculteurs ne sont même pas conscients de faire partie d'une association. En outre les membres des associations n'ont pas d'idée précise des bénéfices qu'ils peuvent obtenir de telles structures. Deuxièmement, les capacités d'action des associations sont assez réduites. Peu d'associations disposent de salariés et lorsque c'est le cas, les salariés sont souvent liés à des organismes publics. Ceci a pour effet de réduire considérablement leur disponibilité et leur marge de manœuvre. Enfin, les responsables des associations ont des difficultés pour animer les structures et à élaborer de réelles stratégies d'appui technique aux adhérents.

Dans ce contexte, il semble qu'un appui organisationnel aux associations pourrait favoriser le renforcement de ces structures nécessaires au développement technique de l'agriculture et de l'irrigation dans la région.

D'autres structures existantes et déjà organisées pourraient porter des projets de développement technique. C'est notamment le cas des coopératives qui regroupent les exploitants par lot de distribution de l'eau. Par ailleurs, des résultats positifs en matière d'organisation ont été observés dans les coopératives laitières.

Figure 7- 2 – Discussion à la sucrerie sur la structure et le rôle des associations d'exploitants avec un ingénieur et un exploitant agricole responsable d'association et un chercheur de l'INRA de Kenitra



Par exemple, dans le cas de la zone de Darb El Arbaïn, l'une des problématiques majeures est la définition d'un projet hydro-agricole qui permette de valoriser au mieux les investissements et les coûts de fonctionnement élevés qu'implique le pompage dans la ressource souterraine profonde. Dans le cas du Lot-et-Garonne, la question au niveau de l'exploitation est de savoir s'il existe des moyens technico-économiques de réduire les coûts de l'irrigation pour faire face à l'augmentation programmée du coût de l'électricité, au repositionnement de la politique agricole commune et aux futures recommandations de la loi sur l'eau.

Quelle que soit la problématique de zone, le cœur du programme proposé reste centré sur trois objectifs : **l'amélioration des résultats de production** de l'agriculture irriguée, **la maîtrise de l'impact sur les ressources en eau** et la **maîtrise de la demande en énergie**. Pendant la préparation du projet, il convient de définir en quoi ces trois préoccupations de base peuvent apporter des éléments de réponses aux problèmes spécifiques de la zone étudiée. Il est entendu qu'à ce niveau d'avancement du programme les objectifs ne sont définis que comme des grandes lignes et qu'ils évolueront nécessairement au cours des phases ultérieures et notamment de la consultation des acteurs.

7.2 Montage

La phase montage du programme de diagnostic a d'abord pour but d'impliquer l'ensemble des acteurs concernés et de déterminer leur contribution et leur rôle respectif dans la réalisation de la suite du programme. Cette phase consiste également à préciser les objectifs du programme par une démarche de consultation des acteurs et à établir les cibles prioritaires du diagnostic en termes de structure d'exploitations. Enfin, il s'agit de décrire les principaux éléments opérationnels du programme local : groupes de travail, moyens et calendrier.

7.2.1 Identifier les acteurs concernés par le programme

Plusieurs groupes d'acteurs sont concernés par les questions de gestions de l'eau, de l'énergie et de production agricole. Suivant les pays, il existe des organismes plus ou moins bien structurés pour répondre à ces préoccupations à l'échelle locale. Ces organismes disposent tous d'une expertise et de données qui peuvent être très utiles dans la réalisation du programme. Ils peuvent en outre être intéressés à contribuer directement ou indirectement à la mise en œuvre du projet.

Ces acteurs sont principalement :

- les gestionnaires de périmètres irrigués,
- les gestionnaires de la ressource en eau,
- les agences locales ou régionales de maîtrise de l'énergie,
- les coopératives agricoles,
- les groupements professionnels institutionnels (chambres d'agriculture),
- les exploitants agricoles,
- les autres partenaires (bureaux d'études, fournisseurs de matériel d'irrigation et de pompage, responsables politiques locaux).

Il convient d'identifier l'ensemble de ces groupes d'acteurs, ainsi que les contacts concernés directement par le programme et de solliciter leur participation dans sa définition. Dans le cas où ils ne souhaitent pas participer à la réalisation du programme, on maintiendra par la suite un contact en les tenant informés des grandes étapes et des principaux résultats obtenus.

Encadré 7-2 - Mode d'élaboration des groupes cibles pour les enquêtes

Dans le département du **Lot-et-Garonne** l'identification des exploitations cibles pour l'enquête s'est faite en collaboration avec la Chambre d'Agriculture (CA) du département. Dans le cadre de l'élaboration des bulletins hebdomadaires d'aide au pilotage de l'irrigation, cet organisme en partenariat avec une association locale (ACMG : Association Climatique de Moyenne Garonne) entretient des relations suivies avec un groupe d'exploitants volontaires. La CA et l'ACMG réalisent chaque semaine des prélèvements de sol sur un échantillon représentatif de parcelle regroupant les principaux couples sol – culture. Le choix des exploitations cibles s'est appuyé sur les informations disponibles concernant ces exploitations. Cela a permis de disposer d'un échantillon représentatif déjà validé. En outre, l'enquête a pu s'appuyer sur la relation de confiance déjà existante entre les exploitants et la CA pour l'implication des exploitants dans l'enquête. Cependant, il convient de noter que si l'échantillon apparaît représentatif du point de vue de la structure des exploitations (surfaces, cultures et techniques d'irrigation utilisées), la technicité dans les exploitations ciblées de la sorte peut être supérieure à la moyenne, notamment en matière de pilotage de l'irrigation. En effet, les exploitants volontaires pour le suivi des bilans hydriques, inscrivent leur démarche dans une stratégie d'amélioration des techniques et de la technicité au sein de l'exploitation, ce qui n'est pas nécessairement le cas de la majorité des exploitations du département. Dans la mesure où relativement peu de démarches d'optimisation technico-économique portant sur le coût énergétique ont été mises en œuvre, on peut néanmoins considérer qu'en la matière, l'échantillon reste assez représentatif de l'ensemble.

Dans **la région du Gharb** au Maroc, l'échantillonnage des exploitations cibles de l'enquête s'est établi d'une part sur la base des connaissances de la zone dont dispose le partenaire de l'étude (INRA de Kénitra) et d'autre part sur les résultats concernant le Gharb et le Maroc exposés au cours du séminaire Wademed de Rabat. L'échantillonnage s'est axé essentiellement sur quatre types d'exploitations : des exploitations bénéficiant du réseau collectif gravitaire d'une part et sous pression d'autre part et des exploitations de petite taille et de grande taille pratiquant le prélèvement d'initiative privée dans la nappe ou dans le réseau hydrographique de surface.

Dans les deux cas, le petit nombre d'exploitations ayant fait l'objet d'une enquête ne permet pas de prétendre à une validité statistique des résultats. En revanche, la démarche permet de décrire une typologie des exploitations et des caractéristiques techniques et des marges de manœuvre d'amélioration associées.

7.2.2 Monter le programme local

Constituer le groupe de suivi du programme

Suite à la présentation du programme dans ces grandes lignes, les représentants des différents organismes décident leur niveau d'implication dans le projet et le temps qu'ils sont prêts à lui consacrer. On établit alors un groupe de suivi du programme.

La mission du groupe de suivi consiste à définir les orientations des étapes clés du programme et à relayer l'information vers les organismes dont sont issus les membres. Le groupe de suivi participe à l'élaboration du budget du programme, définit les moyens financiers, humains et matériels à mobiliser et cherche à mobiliser les contributions de chaque groupe d'acteurs (ressources humaines, locaux, matériel de mesure, véhicule, financement). En outre, chaque membre est considéré comme une personne ressource pour l'accès aux informations et aux compétences concernant son domaine d'intervention ; en cette qualité, il pourra être sollicité par les personnes en charge de la réalisation du diagnostic.

Définir les objectifs

Le groupe de suivi, fort de son expertise élargie, redéfinit et précise les objectifs pour la zone. Lorsque c'est possible, le groupe définit ces objectifs en termes de **valeurs cibles** pour les résultats de production, la gestion des ressources en eau, la maîtrise de la demande en énergie, et le gain de performance des exploitations. Les objectifs en termes d'amélioration de la connaissance de la zone, et de préparation d'actions ultérieures sont également précisés à cette occasion. Par ailleurs, le groupe de suivi définit, dans leurs principes, les règles d'évaluation des résultats en ce qui concerne les objectifs du projet.

Ebaucher les groupes d'exploitations cibles du programme

En fonction des objectifs définis, et des particularités de la zone d'étude, une première ébauche des exploitations cibles du programme est proposée. Cette proposition repose sur la connaissance des exploitations dont dispose le groupe de suivi. Il peut s'agir de bases de données regroupant des informations sur la structure des exploitations, d'exploitations connues pour avoir déjà été intégrées dans ce type de démarche,... La sélection des exploitations cibles se fait sur la base du potentiel que ces exploitations recèlent vis-à-vis des objectifs du programme. Pour un programme important, le groupe définit les critères de sélection. La sélection est alors réalisée dans la phase opérationnelle.

Diffuser le programme, impliquer les exploitants, pour la phase de diagnostic

Une campagne d'information visant à présenter le programme de diagnostic est organisée pour **impliquer les exploitants agricoles** dans la réalisation du projet. Cette campagne peut prendre plusieurs formes suivant le niveau de formation des exploitants avec lesquels on souhaite travailler (atelier de présentation, envoi de dossier, campagne d'affichage avec mise à disposition de contacts permanents,...).

Les exploitants montrant un intérêt pour la démarche (renvoi des fiches, ou prise de contact avec les chargés de réalisation du programme) sont intégrés prioritairement dans les groupes cibles déterminés par l'étude préparatoire.

Tableau 7-1 - Exemple de calendrier de programme : calendrier trimestriel de programme pour l'étude et l'amélioration des performances eau-énergie de l'irrigation dans la zone de Darb El Arbaïn en Egypte. Calendrier présenté par l'association DEMETER dans le cadre d'un « rapport de présentation » de projet au Fonds Français pour l'Environnement Mondial (FFEM)

Activité	PHASE 1					PHASE 2					PHASE 3					
	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16
Mise en place de la cellule projet et de la logistique au Darb	■	■														
Sélection des fermes et techniques de démonstration, acquisition de données complémentaires		■	■													
Mise en place, démo. 8 fermes			■	■	■	■	■									
Investissement et phase II, réalisation sur 8 forages complets						■	■	■	■	■	■					
Préparation de la Phase III, ajustement du programme au financement										■	■					
Phase III 41 forages et interconnexions										■	■	■	■	■	■	■
Voyages d'études				I					I							
Séminaires/formation				I				I				I				I
Comité de Pilotage (6 mois)		I		I		I		I		I		I		I		I
Rapport périodique d'activité (3 mois)	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I

Eléments pour l'élaboration du calendrier

Le calendrier de réalisation du programme doit d'abord se conformer aux contraintes de l'agriculture irriguée en termes de saison d'activité. En effet, le diagnostic approfondi de performances de l'irrigation nécessite la réalisation de mesures sur les systèmes dans leurs conditions réelles de fonctionnement. Si on s'intéresse au cas d'un programme en France, cela signifie que la phase de diagnostic approfondi devra se faire de juin à fin août. Cette contrainte peut servir de base à l'élaboration du calendrier pour les phases antérieures et postérieures au diagnostic.

Un deuxième élément à prendre en compte pour la préparation du calendrier est la durée requise pour les différentes tâches et les ressources humaines disponibles pour les mener à bien. D'après l'expérience acquise en Lot-et-Garonne et dans le Gharb, on peut estimer que la collecte des données sur trois à quatre exploitations de tailles moyennes peut être faite en un jour. Concernant le traitement des données on estime que deux à quatre heures sont nécessaires pour réaliser un traitement complet. Cependant il convient de noter que la durée d'analyse de chaque cas diminue lorsque le nombre de cas traités augmente (Tableau 7-1).

7.2.3 Evaluer les moyens et les ressources pour la réalisation du programme

Les ressources humaines pour la réalisation du programme

On estime le besoin en ressources humaines du programme de diagnostic à deux à trois personnes à plein temps sur une durée d'un an pour la partie montage, réalisation du diagnostic et restitution des résultats dans le cadre d'un programme portant sur 200 exploitations. Dans la deuxième partie de diffusion des résultats et d'accompagnement des exploitants agricoles, le besoin en ressource humaine augmente pour toucher une proportion plus importante de la population d'agriculteurs de la zone. A raison de deux jours en moyenne passés par exploitation et par an, il faut un conseiller pour 100 exploitations. Ces besoins pour une zone sont d'autant plus considérables que la taille des exploitations est petite et que le niveau de formation des exploitants est faible, ces deux éléments allant souvent de pair.

Si on considère l'étendue des tâches de l'équipe opérationnelle, d'après la description ci-dessus, le champ des compétences qu'elle doit regrouper apparaît relativement large. En effet, cette équipe doit détenir à la fois des **compétences techniques** en agronomie, hydraulique et énergétique, des compétences en **animation, organisation, et formation** dans différents contextes (institutionnel, milieu rural), et de bonnes bases en **gestion de projet**. En plus de ces compétences de base, l'équipe opérationnelle doit être capable d'utiliser et de développer des outils d'évaluation des performances des pratiques et des infrastructures et de l'impact des actions. Enfin, dans la phase de réalisation des diagnostics, chaque membre de l'équipe doit faire preuve d'une grande **capacité d'écoute et d'analyse**.

Les membres de l'équipe opérationnelle sont des salariés de l'organisme porteur du projet (association d'agriculteurs, chambre d'agriculture). Dans le cas où ils ne disposent pas de l'ensemble des compétences techniques nécessaires à la réalisation du programme, ils pourront avoir recours à des formations techniques ou s'appuyer sur les compétences disponibles dans le groupe de suivi. On peut en outre envisager de faire reposer une partie du programme sur la mobilisation des services d'auditeurs indépendants. Cependant si ce recours porte sur une partie significative du programme, le coût de tels services risque d'alourdir considérablement le budget du programme.

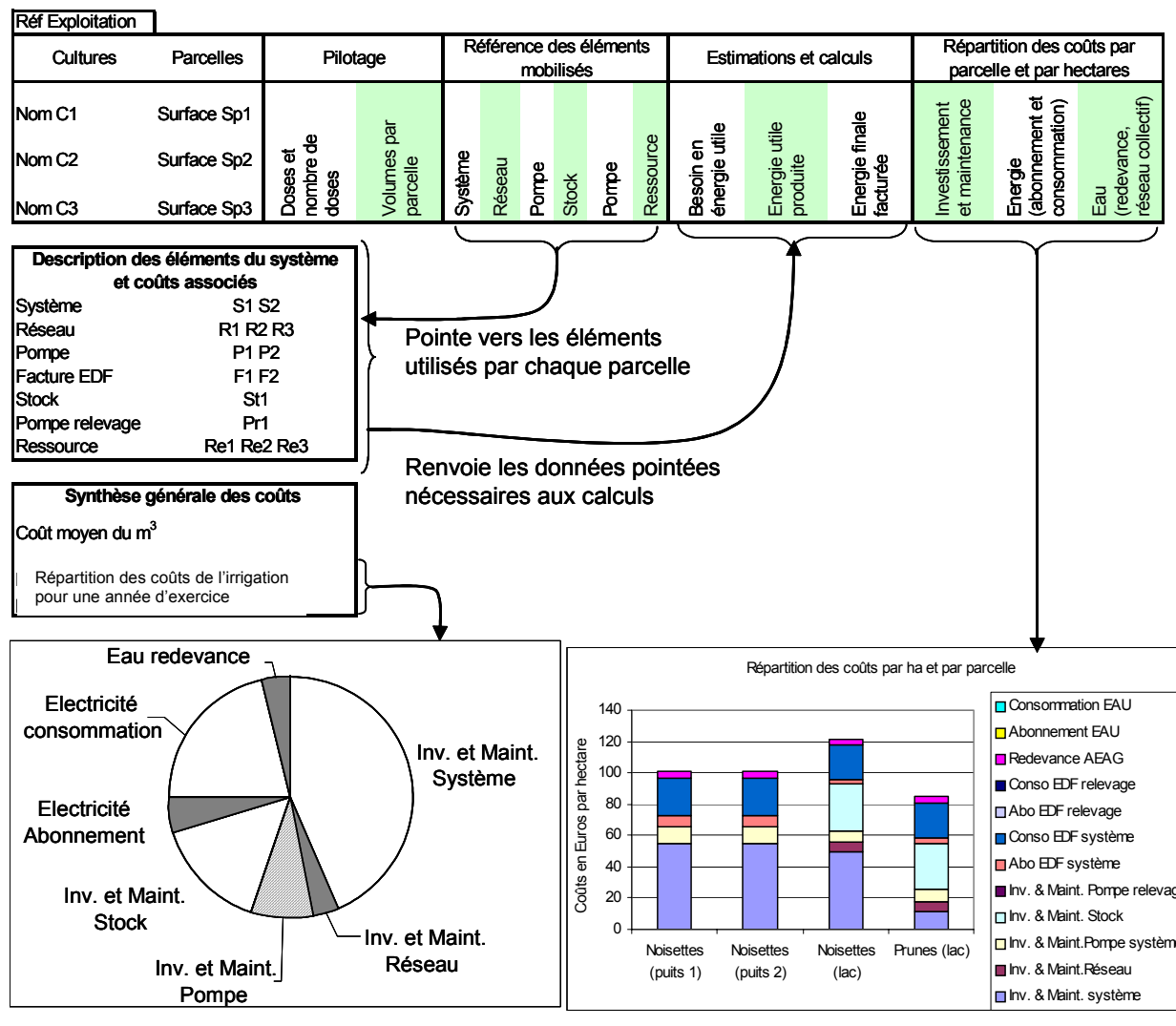
Encadré 7-3 – Un outil spécifique pour l'analyse des performances énergétiques de l'irrigation à l'échelle des exploitations et des parcelles

Le traitement des résultats de l'enquête du Lot-et-Garonne a nécessité le développement d'un outil d'analyse spécifique ayant pour but de détailler les aspects suivants :

- la répartition des besoins en énergie utile de chaque élément du système d'irrigation, depuis la ressource en eau jusqu'aux cultures,
- la répartition des besoins en énergie utile entre les différentes parcelles,
- le rendement de conversion de l'énergie finale en énergie utile.

Pour ce faire, une application Excel a été développée qui permet de déterminer quels volumes d'eau sont mobilisés pour chaque parcelle et quelles sont les caractéristiques hydrauliques du trajet suivi par l'eau, élément par élément, de la ressource à la culture.

Figure 7- 3 - Schéma de l'application utilisée pour analyser les résultats d'enquête et permettant de déterminer la répartition de coûts par élément et pour les différentes parcelles



Matériels

La réalisation du diagnostic repose sur la disponibilité de matériel pour la bureautique, la localisation géographique et la mesure. Le matériel de bureautique se limite à un ou deux ordinateurs munis des logiciels de bases (traitement de texte, tableur, éventuellement logiciel de gestion de base de données) et des outils logiciels nécessaires en fonction du type de système d'irrigation utilisés dans la zone d'étude. Pour repérer la localisation géographique des exploitations une carte de type IGN 1/50000 ou 1/25000 est suffisante, mais l'utilisation d'un GPS peut s'avérer utile pour repérer des stations de pompage ou des forages.

Le matériel de mesure nécessaire est le suivant :

- mesure de débit :
 - débitmètre à ultrasons adaptable pour des sections de 12 mm à 200 mm,
 - chronomètre pour la mesure de débits sur compteur d'eau,
 - verre gradué pour la mesure des débits de goutteur en irrigation localisée,
 - un jeu de seuils pour la mesure de débit en canalisations ouvertes,
- mesures de pression :
 - un jeu de manomètres adaptables,
- mesures des consommations d'énergie :
 - un verre gradué pour la mesure des consommations de gasoil,
 - un chronomètre,
- mesure de la réserve utile du sol :
 - une tarière pour effectuer les prélèvements,
 - une étuve,
 - une balance précise à 0,1 g.

Les outils d'évaluation

En plus de la capacité d'analyse dont disposent les membres de l'équipe, le diagnostic des exploitations peut être renforcé et rendu plus efficace par le recours à des outils d'évaluation. Ces outils concernent des aspects techniques particuliers pour lesquels une analyse déterministe basée sur des données mesurées ou collectées auprès de l'exploitant est pertinente. Ce sont notamment les outils d'aide au dimensionnement des systèmes, d'aide aux choix des paramètres de conduite de l'irrigation et d'aide aux choix d'assolement. Ces outils se présentent souvent sous la forme de logiciels, ou de guides d'évaluation qui peuvent être utilisés soit par des techniciens soit par les agriculteurs directement.

Parmi les nombreux outils développés pour venir en appui à la démarche d'optimisation des irrigants ou des associations d'irrigants, on peut citer :

- pour l'aide au pilotage de l'irrigation : IRRINOV (Arvalis) guide adressé aux irrigants, PILOTE modèle de réalisation des bilans hydriques (Cemagref), CROPWAT logiciel d'aide au pilotage (FAO),
- pour l'aide à la conception et à l'optimisation des performances des systèmes d'irrigation par aspersion : CVI (Cemagref) logiciel pour la conception des système d'irrigation par couverture intégrale, CALPIV (Cemagref) dimensionnement du busage de rampe et de pivot, VERIP (Cemagref) analyse des débits des buses sur les pivots,

Encadré 7-4 - Eléments d'évaluation des dépenses à prendre en compte pour la réalisation d'un programme de diagnostic en Lot-et-Garonne

Dépenses directes

Dépenses fixes à amortir sur plusieurs programmes (année 2005)

Débitmètre	1	6000 à 7000 €
Informatique	1	1500 €
Autres	1	2000 €

Dépenses par exploitation

Carburant + véhicule (0,2 € / km x 50 km)	(100 km)	10 € / expl.
---	----------	--------------

Dépenses indirectes

Besoin en ressources humaines pour le diagnostic par exploitation

Etude préparatoire	1 à 1,5 h / expl.
Diagnostic approfondi	
Préparation	0,5 h / expl.
Enquête	2 h / expl.
Déplacement	1 h / expl.
Analyse conception des recommandations	2 h / expl.
TOTAL diagnostic	5,5 h / expl.

Besoins fixes du programme en ressources humaines

Montage de projet (1 mois-homme)	140 h
Animation et restitution des résultats	140 h

- pour l'aide au choix des paramètres de conduite de l'irrigation à la raie : RAIEOPT (Cemagref, Mailhol), SIRMOD (Walker, 1993 cité par Mailhol, 2001) modèle pour l'optimisation,
- pour l'aide au choix des cultures et des assolements sur des critères économiques : LORA (Arvalis).

En outre, on propose d'élaborer un outil pour l'évaluation de la répartition des coûts en énergie et la simulation de l'impact des interventions sur ces coûts. La structure de cet outil est présentée dans le chapitre suivant.

Eléments pour l'évaluation des dépenses

On propose de distinguer les dépenses directes et les dépenses indirectes associées au programme d'audit. L'Encadré 7-4 donne quelques éléments d'appréciation des dépenses pour la réalisation d'un programme de diagnostic.

Les dépenses directes :

- frais de déplacement (de 25 à 100 km par exploitation),
- matériel (matériel de mesure et de bureautique),
- prestations de services réalisées par des bureaux d'études indépendants,
- formation (payante) de l'équipe opérationnelle,
- outils spécifiques d'évaluation.

Les dépenses indirectes :

- les ressources humaines mobilisées,
- les frais d'hébergement du projet (bureaux, téléphone, accès Internet).

Les ressources humaines constituant l'équipe opérationnelle sont considérées comme des dépenses indirectes dans la mesure où elles sont mobilisées au sein des organismes qui participent au programme et plus particulièrement dans l'organisme porteur du projet.

7.3 Réalisation

Les étapes de la réalisation de l'étude préparatoire et du diagnostic présentées dans ce paragraphe sont détaillées dans le chapitre suivant portant sur la démarche de diagnostic à l'échelle de l'exploitation.

7.3.1 Etude préparatoire sur le premier groupe (1), large, d'exploitations cibles

Le groupe cible (1) est constitué des exploitants qui répondent aux critères de la problématique traitée et qui ont manifesté leur intérêt pour la réalisation du diagnostic.

Objectifs

Au niveau de l'exploitation agricole, l'étude préparatoire a pour objectif de repérer les marges de manoeuvre d'amélioration par une analyse des performances générales de l'exploitation. Au terme de ce repérage, une orientation des points spécifiques à approfondir dans le cadre du diagnostic est proposée.

Dans le cadre du programme, les résultats de l'étude préparatoire permettent de disposer d'une description plus précise des contraintes de l'agriculture dans la zone et de faire remonter des informations synthétiques utiles pour l'orientation des démarches à l'échelle de l'ensemble de la zone.

Encadré 7-5 - La production de sucre dans le Gharb (1/4) : présentation générale

Dans le cadre de l'étude préparatoire pour le Gharb, on recherche les cultures irriguées qui représentent un fort potentiel pour la zone tant sur le point des économies d'eau que sur celui de l'amélioration de la rentabilité des cultures irriguées. De ce point de vue, la production sucrière constitue un bon exemple. En effet, le sucre contribue pour 11% à la DEA moyenne nationale, le Maroc produit 46% de sa consommation et 35 % de la production est réalisée dans le Gharb (13000 ha de canne à sucre et 16000 ha de betteraves sucrières). Cependant, on remarque que la demande en eau de la canne à sucre est beaucoup plus élevée que celle de la betterave.

Figure 7- 4 - Répartition des principales cultures irriguées dans le Gharb

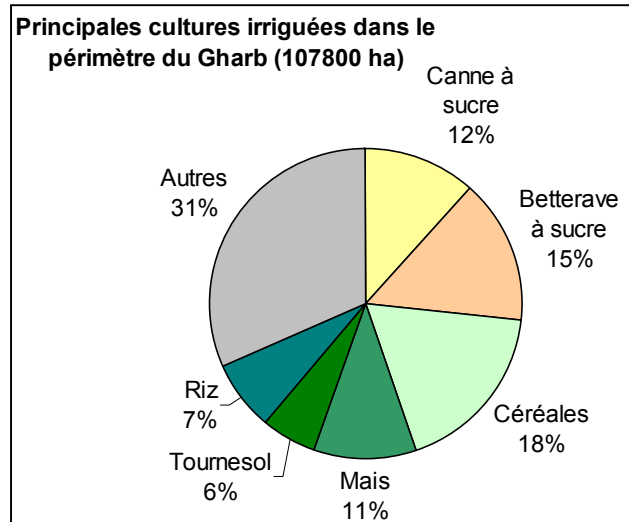
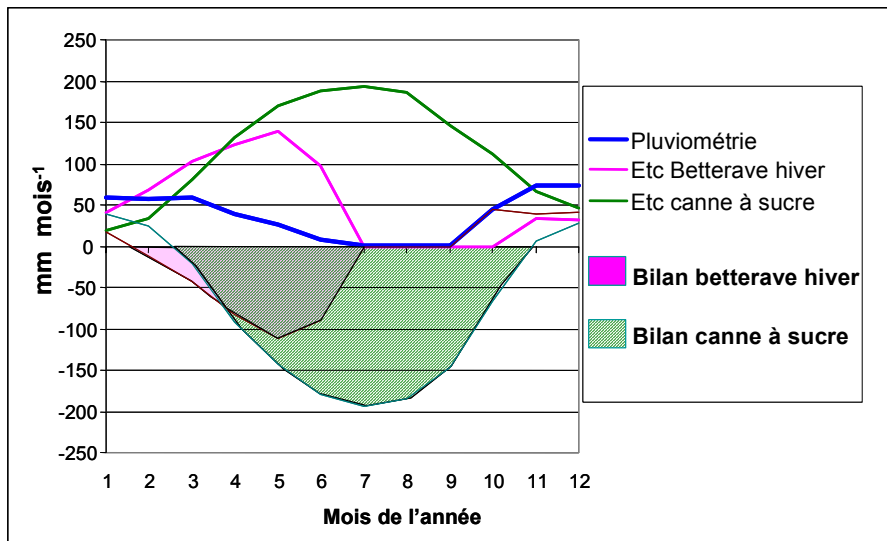


Figure 7- 5 – Bilan (pluviométrie – évapotranspiration) de la culture de betteraves et de la culture de canne à sucre pour les conditions climatiques de Rabat (80 km au Sud de la région du Gharb)



Le potentiel de réduction des consommations d'eau par l'abandon ou le remplacement de la culture de canne à sucre est significatif. On définit ensuite les informations à collecter au niveau des systèmes et des exploitations pour déterminer le coût en énergie et la rentabilité de l'activité afin de valider l'intérêt économique d'un changement d'assolement. Ces observations constituent le point de départ de l'identification d'une cible d'amélioration que l'on propose d'approfondir dans les trois encadrés suivant : Encadré 7-7, Encadré 8-14 et Encadré 8-15.

Montage opérationnel

Le montage opérationnel de l'étude préparatoire a pour but de constituer l'équipe opérationnelle, de préparer, avec cette équipe, le calendrier de réalisation et de définir les contributions des acteurs membres du groupe de suivi dans la réalisation de l'étude préparatoire.

Réalisation de l'étude préparatoire

La première étape de l'étude préparatoire consiste à établir **un état des lieux de la zone** en collectant les données spécifiques à la zone et non spécifiques aux exploitations (données climatiques, grille tarifaire de l'énergie, fournisseurs et prix du matériel). Ces informations sont utiles pour établir les besoins en eau de référence et pour déterminer les coûts de référence de la pratique dans la zone. La mobilisation de l'ensemble des acteurs pour la collecte de ces données sera utile.

Il s'agit ensuite de collecter des **informations générales concernant les résultats des exploitations**. Suivant le contexte de réalisation du diagnostic, plusieurs possibilités peuvent être envisagées pour cette première collecte de données : réalisation téléphonique, ou par l'agriculteur seul sur la base d'un questionnaire, ou par traitement d'une base de données des déclarations d'agriculteurs,...

Pour chaque exploitation, l'équipe opérationnelle réalise ensuite le **calcul des indicateurs** de performance et la **synthèse** de l'étude préparatoire par exploitation et pour la zone. Il s'agit d'établir des groupes d'exploitations en fonction de la nature et du potentiel d'améliorations. Dans le cas où cette étude générale permet de tirer des conclusions utiles pour les exploitants, les résultats peuvent être communiqués par courrier ou à l'occasion d'ateliers de restitution. Si elle est jugée nécessaire à ce stade, une campagne d'information peut être organisée à l'attention de l'ensemble des exploitants.

En ce qui concerne cette étape d'étude préparatoire, il est à noter que, dans certaines situations, elle peut être très allégée, voire même évitée, si les informations dont dispose le groupe de suivi sont suffisantes pour préparer le diagnostic approfondi des exploitations.

7.3.2 Diagnostic approfondi sur le second groupe (2), restreint, d'exploitations cibles

Objectif

Au niveau de l'exploitation, le diagnostic approfondi a pour objectif d'évaluer les performances de l'irrigation sur des aspects techniques précis et d'identifier les actions les plus pertinentes pour améliorer ces performances. L'équipe opérationnelle se charge également du recensement et de l'évaluation des gains de performances des actions mises en œuvre ou envisagées par les exploitants. Lorsque ces actions présentent de réels avantages, elles sont repérées en tant que bonnes pratiques et intégrées aux listes d'actions.

Au niveau du programme, le diagnostic permet également de repérer les actions les plus fréquemment recommandées et d'envisager des démarches spécifiques allégées d'amélioration qui pourront être appliquées sur un échantillon plus important d'exploitations.

Encadré 7-6 – « Lot et Garonne » - Une synthèse des résultats pour les irrigants et leurs partenaires institutionnels : Répartition des coûts de l'irrigation pour les exploitants agricoles

Les investissements se répartissent entre les infrastructures de mobilisation et de transport de l'eau, le matériel de répartition de l'eau au niveau de la parcelle, et la station de pompage. Les facteurs qui ont le plus d'influence sur le choix des infrastructures sont le type de culture pratiquée et les dimensions des parcelles (Tableau 7-2) et les infrastructures à mettre en œuvre pour mobiliser les ressources en eau (Tableau 2-2).

Tableau 7-2 – Systèmes d'irrigation adaptés au type de culture et à la surface des parcelles - fourchette d'investissement par type de système

	< 5 ha	5 à 15 ha	15 à 50	> 50
Grandes cultures	C.I	C.I / E	E / R	R
Arboriculture	C.I / L	C.I / L	C.I / L	
Légumes	C.I / L	C.I / L / E	C.I / L / E	
Semences	C.I / E	C.I / E	C.I / E	
Tabac	C.I / E / L	C.I / E / L		

C.I : Couverture intégrale (65 à 170 € / ha / an) ;
 E : Enrouleur (25 à 50 € / ha / an) ;
 L : Irrigation localisée (35 à 300 € / ha / an) ;
 R : Rampe

Tableau 7-3 – Fourchette de coûts d'investissement pour les infrastructures de mobilisation de la ressource en eau

	Investissement	Durée de vie
	euro / m	années
Réseau enterré		
Canalisation (110 mm)	3 à 6	15 à 30
Tranchée	5	15 à 30
Pompe	euro / unité	
de 6 à 15 kW	1200 à 4000	15 à 20
de 15 à 40 kW	3000 à 6000	15 à 20
Lac collinaire	euro / 1000 m3	
35000 à 60000 m3	500 à 900	>30

Les frais de fonctionnement se partagent entre coût de l'eau et coût de l'énergie. Le coût de l'eau se compose de la redevance prélevée par l'agence de bassin (4,29 € / 1000 m³) à laquelle s'ajoute le prix de l'abonnement et celui de la consommation en cas d'utilisation d'un réseau collectif. Pour le coût de l'énergie, quasi exclusivement de l'électricité, on distingue le coût de l'abonnement EDF et celui de la consommation proprement dite. La Figure 7- 6 met en évidence la variabilité du coût de l'irrigation en fonction du type de ressources en eau. La Figure 7- 7 présente les résultats d'enquête concernant la répartition entre coûts de fonctionnement et investissement au niveau de la parcelle pour les principaux types de cultures.

Figure 7- 6 - Répartition des frais de fonctionnement sur 19 exploitations du Lot-et-Garonne. Prise en compte des abonnements, des consommations et classement par type de ressource

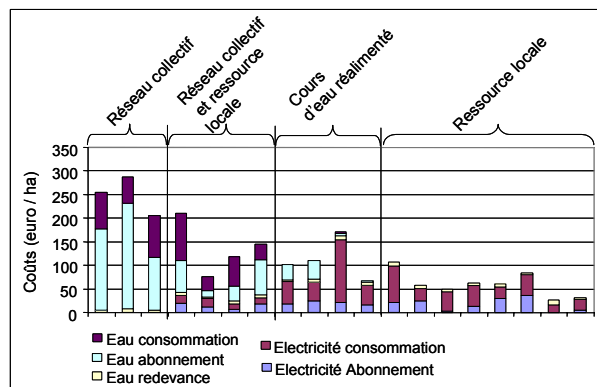
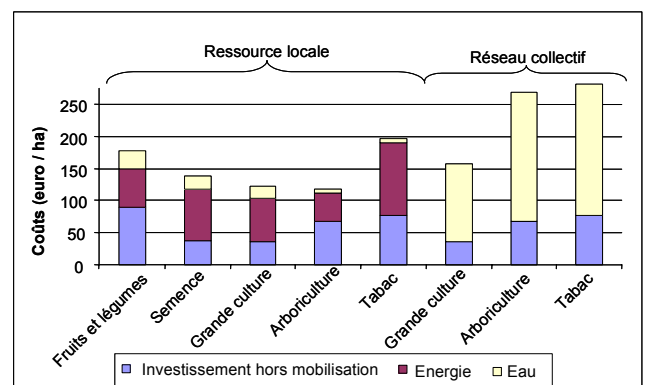


Figure 7- 7 - Répartition par type de culture, des coûts moyens d'investissement et de fonctionnement au niveau de la parcelle irriguée. Dans cette figure, les investissements pour les réseaux, les stations de pompage et les lacs ne sont pas pris en compte



Montage opérationnel

Le montage opérationnel du diagnostic approfondi consiste à définir et à structurer les modalités de réalisation. Dans ce but, l'équipe opérationnelle, mise en place pour l'étude préparatoire, et le groupe de suivi peuvent être amenés à définir pour cette phase, une équipe opérationnelle spécifique, renforcée, notamment pour la réalisation des enquêtes et des mesures sur les exploitations. Les contributions des acteurs sont reconsidérées pour répondre aux particularités du diagnostic approfondi. L'équipe opérationnelle et le groupe de suivi établissent le calendrier de réalisation du diagnostic.

Réalisation

La phase d'enquête et de mesure doit être précédée d'un travail de mise en forme et d'adaptation des modalités du diagnostic prenant en compte les résultats de l'étude préparatoire. Un dossier spécifique est constitué pour chaque exploitation. Une grille de base des informations à collecter est proposée dans l'encadré. Des rendez-vous sont pris avec les exploitants auxquels l'équipe opérationnelle indique quels sont les documents qu'ils doivent préparer, la nature des mesures qui seront effectuées et la durée de l'enquête.

La réalisation de l'enquête consiste d'abord à collecter les informations de l'exploitation nécessaires au diagnostic. Un autre aspect essentiel de la réalisation de l'enquête est le dialogue avec l'exploitant. A l'occasion de ce dialogue, l'exploitant peut être amené à expliciter les raisons qui l'ont conduit à faire tel ou tel choix technique ou à décrire en détail sa stratégie en matière d'aménagements hydro-agricoles. Dans un même temps, des informations techniques peuvent être transmises à l'exploitant.

Les mesures portent sur les conditions d'utilisation du matériel de pompage et d'irrigation. Elles permettent de déterminer le rendement réel des différents organes des systèmes d'irrigation et notamment de la station de pompage.

L'analyse des données collectées se conduit en trois étapes :

- La première consiste à déterminer les indicateurs de performances propres à chaque élément technique en termes de coûts en ressources humaines, énergie, eau, en termes de coûts financiers et éventuellement d'implications sur d'autres aspects comme la surface utile, l'efficacité d'application des engrais,... Ces indicateurs de performance permettent d'identifier les champs d'action prioritaires.
- La deuxième étape de l'analyse consiste à évaluer, par la simulation, l'impact de la mise en œuvre des actions disponibles dans les champs d'action prioritaires.
- La troisième étape consiste à valider la proposition des actions en vérifiant qu'elles sont compatibles avec les contraintes de l'exploitation et la stratégie de l'exploitant. Les actions validées sont ensuite classées en fonction de leur portée et de leur intérêt vis-à-vis des critères de l'exploitant et vis-à-vis de la problématique de la zone.

7.4 Restitution et valorisation des résultats

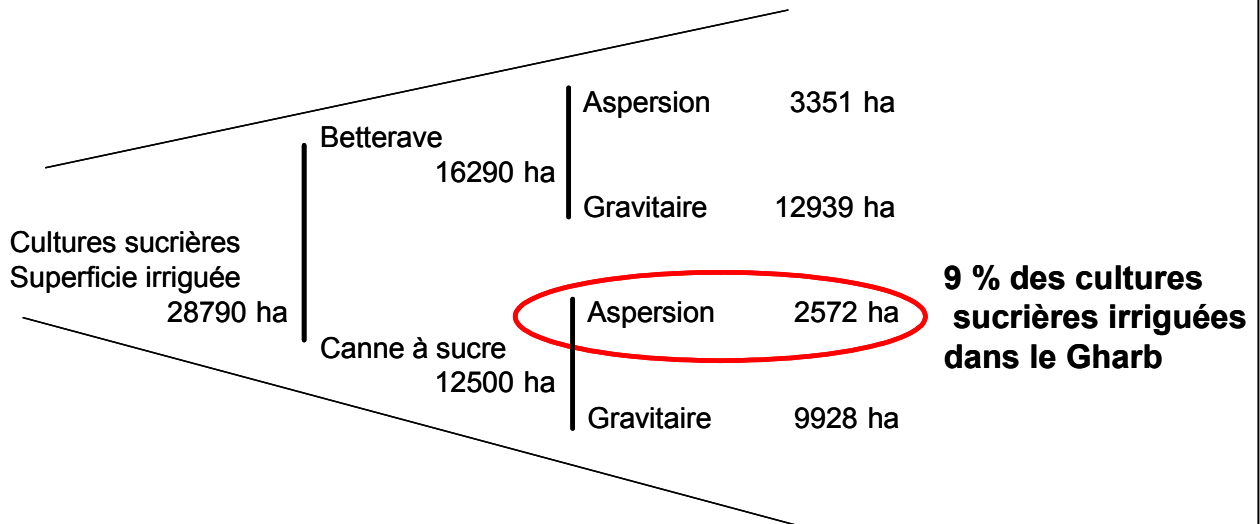
La restitution des résultats a pour but de bien faire percevoir aux différents acteurs les marges de manœuvre mises en évidence par le diagnostic et de leur fournir tous les éléments nécessaires pour prendre la décision de mettre en œuvre telle ou telle action. Il convient par conséquent de mettre en œuvre l'ensemble des moyens nécessaires à une bonne communication pendant cette étape.

Encadré 7-7 - La production de sucre dans le Gharb (2/4) : la canne à sucre irriguée par aspersion, une cible privilégiée

L'étude de la demande en eau et en énergie de l'irrigation pour la production sucrière montre que l'irrigation de la canne à sucre par aspersion présente des coûts élevés (eau, énergie et coûts de production) et que les résultats obtenus en termes de production ne permettent pas de justifier pleinement l'utilisation des réseaux sous pression pour cette culture.

Ce type de résultat peut être présenté dans le cadre d'un programme de diagnostic. Cependant, il convient de déterminer la représentativité de la cible identifiée. Cette démarche permettra notamment d'évaluer la portée d'une recommandation allant dans le sens d'une éventuelle reconversion. Pour ce faire, on utilise les données statistiques disponibles sur la zone et on établit l'arborescence des pratiques observées sur la zone.

Figure 7- 8 – Représentativité de la cible identifiée (canne à sucre irriguée par aspersion) dans le Gharb



La Figure 7- 8 montre que la cible identifiée représente une surface importante, significative par rapport à l'ensemble de la production sucrière. Il en résulte qu'une action (restant à identifier) sur la canne à sucre irriguée par aspersion, à l'échelle du Gharb apparaît à la fois pertinente et significative.

Les résultats s'adressent d'abord aux exploitants agricoles, aux gestionnaires des ressources et des infrastructures collectives de la zone. Des synthèses des résultats peuvent également être communiquées aux partenaires potentiels présents sur d'autres zones en vue de partager les expériences dans le cadre d'un réseau élargi et de décrire les conditions de succès et d'échec des programmes.

7.4.1 Restituer des résultats

Le choix du mode de restitution se fait en fonction de la nature des résultats à diffuser, du niveau d'appropriation recherché au sein du groupe d'acteurs auquel s'adressent les résultats et du type de formalisation auxquels les acteurs sont le plus réceptifs. Suivant la nature des supports utilisés, la restitution des résultats peut s'avérer plus ou moins coûteuse en moyens financiers mais surtout en ressources humaines. Cependant, vu les ambitions opérationnelles du diagnostic, cette étape doit retenir toute l'attention du groupe de suivi et de l'équipe opérationnelle et les moyens à mettre en œuvre pour sa réalisation ne doivent pas être négligés.

Les différents modes de restitution des résultats aux exploitants agricoles

Il est essentiel que le mode de restitution permette une réelle appropriation des résultats par les acteurs. Cela implique que la restitution soit faite par un média que ces derniers utilisent couramment et avec aisance. Pour une population d'acteurs familiarisés avec l'utilisation des bulletins d'information et des revues à caractère technique, l'envoi **d'un dossier complet** et spécifique à l'exploitation peut paraître suffisant, tout du moins pour transmettre l'information. En revanche, pour une population d'acteurs peu familiarisés avec le support écrit, d'autres modes de restitution devront être envisagés. Ces modes peuvent être basés sur la communication orale, sur une iconographie adaptée lorsque le type de résultats le permet, ou sur une mise en situation par l'intermédiaire de simulations simples.

Sans qu'on puisse le démontrer ici, on note que la prise en main des résultats (performances, et actions recommandées) par les acteurs peut favoriser la décision finale et la réalisation effective des actions. Dans cette idée, les **ateliers thématiques** stimulant l'interaction entre les acteurs présentent l'avantage de tendre vers une meilleure appropriation des résultats tout en s'affranchissant des contraintes du support écrit (qui peut éventuellement être utilisé en complément).

On peut également envisager un mode de restitution plus personnalisé des résultats dans lequel **des conseillers techniques font la démarche** d'aller sur les exploitations pour examiner les différentes options et leurs implications avec les agriculteurs. Dans ce cas, la confiance accordée aux techniciens par les exploitants est encore une fois une condition de réussite.

Les modes de restitution des résultats pour les gestionnaires

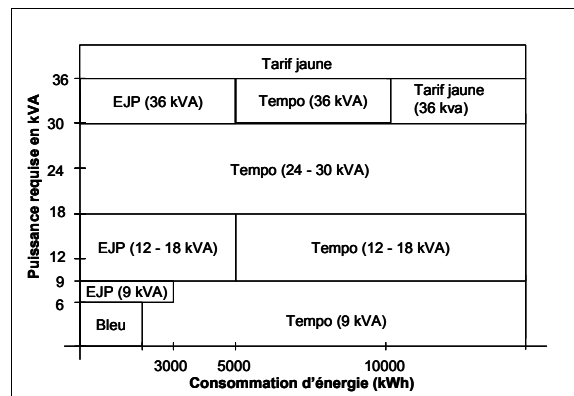
Là encore, la mise en présence des acteurs et la possibilité d'échanger des points de vue semblent être des éléments essentiels pour engager de nouvelles actions et prendre des décisions. En effet, la complexité de chacune des trois thématiques (alimentation, eau, énergie) est telle que de nombreuses interactions entre les acteurs de chacune de ses thématiques sont nécessaires avant que les intérêts convergent et qu'une culture commune donne lieu à la mise en œuvre d'actions concertées. La réalisation de séminaires et d'ateliers est donc tout aussi appropriée pour les gestionnaires que pour les exploitants agricoles.

Encadré 7-8 - Les actions les plus souvent recommandées aux exploitants en Lot-et-Garonne

L'enquête dans le Lot-et-Garonne a été orientée, en accord avec les priorités de la Chambre d'Agriculture du département, vers l'analyse des coûts de l'irrigation et plus particulièrement des coûts énergétiques. A l'issue de l'enquête, des recommandations propres à chaque exploitation et une synthèse générale ont été remises à la Chambre d'Agriculture chargée de diffuser les résultats auprès des exploitants. En outre, un séminaire à l'attention des exploitants et des techniciens agricoles a été organisé. Les trois actions les plus souvent recommandées dans le but de réduire les coûts de l'irrigation au niveau des exploitations sont détaillées ci-dessous.

La première action, qui a un coût nul, consiste en une **adaptation du contrat d'achat de l'électricité** en fonction de la consommation d'énergie et de la puissance requise au niveau de chaque compteur. L'enquête montre qu'environ 30 % des exploitations pourraient ainsi réaliser une économie significative pouvant aller jusqu'à quelques centaines d'Euros. Afin d'aider les exploitants dans leur choix, nous avons réalisé un **graphe d'aide à la décision** permettant de définir le contrat le mieux adapter à leur consommation et à la puissance des installations. On remarque que ce graphe dépend des tarifs disponibles chez le fournisseur d'électricité et qu'il doit être réactualisé à chaque fois que le fournisseur modifie son offre.

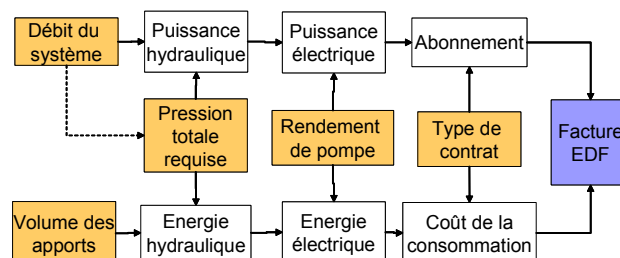
Figure 7-1 - Contrats EDF optimum en fonction de la puissance requise et de la consommation d'énergie moyennement facturée par compteur (hypothèse : utilisation estivale exclusivement)



La deuxième action consiste à **optimiser** le rendement énergétique du pompage par un **dimensionnement optimum des pompes**. 10 des 28 pompes répertoriées au cours de l'enquête présentent un rendement énergétique estimé inférieur ou égal à 40%. L'action recommandée consiste à valider le diagnostic par une caractérisation détaillée du pompage et à remplacer les pompes présentant des mauvais rendements par des pompes adaptées aux caractéristiques débit/pression des systèmes. La méthode utilisée pour évaluer le rendement des pompes est présentée dans l'Encadré 8-7. Suite à l'évaluation du rendement il convient de comparer les coûts et les bénéfices de l'opération de remplacement. Le Tableau 8-12 donne un exemple de calcul des coûts et des bénéfices pour le remplacement d'une pompe présentant un rendement faible.

La troisième action que l'on peut recommander représente un investissement plus lourd, il s'agit dans les configurations qui le permettent d'envisager la **substitution des systèmes d'irrigation par canon à enrouleur** dont la pression de fonctionnement est élevée par des pivots pour les grandes parcelles et par des couvertures intégrales d'aspenseurs pour les petites parcelles. Ces deux techniques présentent l'avantage de fonctionner à des pressions beaucoup plus faibles. En outre elles permettent de réaliser des apports en eau plus fréquents et plus précis tout en présentant des coûts de main d'œuvre qui restent acceptables. Cette action pourra être soutenue par des subventions calculées par exemple au prorata des économies d'eau et d'énergie réalisées.

Figure 7-2 - Récapitulatif des paramètres d'action à prendre en compte pour réduire la facture d'électricité sur une exploitation irriguée



Susciter l'échange des résultats entre les acteurs du monde rural

Dans la mesure où la portée du programme est nécessairement restreinte, **la diffusion des résultats** les plus pertinents et représentatifs vers l'ensemble des exploitants **représente un véritable défi** pour le programme de diagnostic. Dans un rapport récent de la FAO et de l'IPTRID portant sur l'identification et la diffusion des bonnes pratiques en irrigation en Afrique de l'Ouest, Vidal et al. (2004) concluent que, si des expériences prometteuses sont effectivement menées avec succès, il existe, néanmoins souvent, un manque significatif de valorisation des résultats, de suivi des performances et de diffusion des connaissances entre les différents acteurs de l'irrigation.

La difficulté de la diffusion des résultats est, assez souvent voire presque toujours, intimement liée à la possibilité d'utiliser le support écrit. Dans bien des cas de pays en développement, y compris au Maroc où 48 % des adultes sont analphabètes (Royaume du Maroc, 2003) et où la moyenne d'âge des chefs d'exploitation est relativement élevée, l'effort que doivent faire les exploitants pour prendre connaissance d'un document écrit leur apparaît décourageant. Ce problème **réduit considérablement l'efficacité de la diffusion de dossiers rédigés**.

Il existe cependant d'autres stratégies de diffusion des résultats. Ces stratégies nécessitent un investissement humain plus important mais elle peuvent à terme s'appuyer sur les exploitants agricoles eux-mêmes pour la diffusion de bonnes pratiques. Pour ce faire, dans des contextes où le taux d'alphabétisation est faible, la **mise en réseau des acteurs** semble incontournable. Sur ce thème, des savoir-faire sont en train de se constituer, mais des méthodes économes en moyens financiers et humains et qui ne sont pas nécessairement basées sur l'utilisation de l'outil technologique restent à élaborer.

7.4.2 Recueillir les avis

A l'occasion de la restitution, le groupe de suivi du programme et l'équipe opérationnelle sont particulièrement attentifs aux critiques portant sur la faisabilité et les freins possibles au déclenchement des actions proposées, et sur la pertinence et la lisibilité des indicateurs de performance proposés. Les avis des acteurs permettent notamment de valider ou de reconsidérer les actions proposées par rapport aux objectifs du programme et par rapport à la stratégie des exploitants.

Dans certains cas, les résultats peuvent fournir une base argumentaire à tel ou tel groupe d'acteurs pour formuler une requête à l'attention de tel autre groupe. Dans ce cas, le rôle du groupe de suivi et de l'équipe opérationnelle est de préciser le domaine de validité des résultats afin que la portée d'une éventuelle décision soit limitée aux zones où elle serait effectivement avantageuse.

Enfin, les acteurs peuvent être sollicités pour déterminer quels sont les aspects prioritaires relevant des critiques et des discussions soulevées qu'ils souhaiteraient approfondir dans une phase ultérieure du programme.

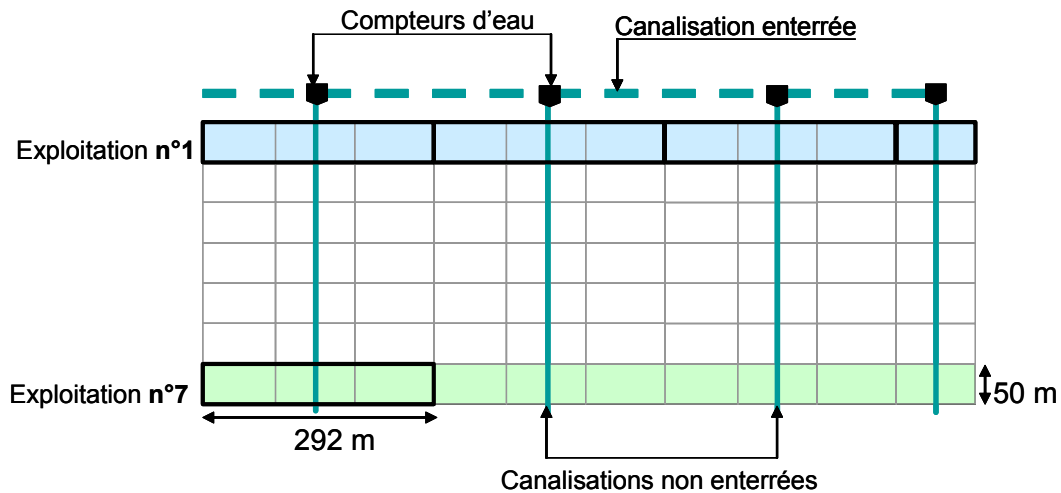
7.4.3 Valider et travailler les actions les plus fréquemment recommandées

La synthèse des résultats permet d'identifier les points de performance, généraux et techniques, sur lesquels les plus grands progrès peuvent être réalisés. A ces points de performance peuvent être associées quelques actions spécifiques particulièrement pertinentes et représentatives pour la zone étudiée.

Encadré 7-9 - Deux exemples marocains d'éléments qui, lors de leur mise en évidence, doivent être intégrés dans la description des cas

Le comptage de l'eau par groupe

Dans les systèmes de distribution collective de l'eau sous pression de la plaine du Gharb, l'eau est distribuée par groupe de sept parcelles. Ce système de distribution est dimensionné pour être utilisé par les exploitants d'après leurs propres règles de pilotage des apports. Contrairement aux systèmes de distribution collective de l'eau, les exploitants ne sont pas soumis à la contrainte de demander une allocation d'eau plusieurs jours à l'avance. Cependant, le comptage et la facturation de l'eau se font à partir d'un seul compteur d'eau par groupe de sept parcelles de sept exploitations différentes. Les règles de facturations stipulent que les exploitants qui ont pratiqué au moins un apport en eau pendant le mois participent au règlement de la facture mensuelle à parts égales. Ce mode de facturation semble peu équitable aux exploitants et le gestionnaire public des aménagements de distribution a dû faire face à plusieurs dégradations du matériel de comptage. En outre, ce mode de facturation n'est intéressant pour un exploitant que s'il arrose au moins autant que les autres ce qui a un effet négatif sur les économies d'eau.



Les canalisations de distribution qui traversent les parcelles

Un autre problème de la distribution collective en réseau sous pression est lié aux systèmes de distribution de l'eau entre les parcelles. Dans la conception du système de distribution chaque parcelle est traversée en son milieu par la canalisation non enterrée qui dessert l'ensemble des sept parcelles. Cette configuration rend l'utilisation de matériel agricole impossible à moins de débrancher les canalisations et de priver d'eau l'ensemble des parcelles en aval. Il en résulte des difficultés d'exploitation et des conflits entre les exploitants qui doivent également être pris en compte dans la recherche de solutions. Ce problème rencontré également dans les périmètres irrigués des Doukkala a été résolu en enterrant les canalisations moyennant des investissements du gestionnaire.

Ces actions les plus fréquemment recommandées peuvent constituer la base d'une nouvelle phase du programme. Cette phase peut s'appuyer sur un diagnostic plus léger, portant sur un nombre de paramètres restreint qui permettent d'établir si oui ou non les actions déterminées de la sorte sont adaptées aux exploitations. Dans la mesure où ces diagnostics spécifiques sont plus légers et où ils reposent sur une expérience existante, la démarche pourra porter sur un échantillon plus vaste d'exploitations. En outre, on peut envisager de réaliser la collecte, l'analyse, et la présentation des résultats dans un même temps et de renforcer si besoin la démarche par un atelier ou une séance de formation spécifique.

Dans cette phase de valorisation des résultats, on peut également envisager de développer des outils d'évaluation et des modalités de diffusion spécifiques aux actions identifiées. Par exemple, la diffusion de fiches techniques d'optimisation des contrats d'abonnement EDF est une action relativement, simple à moindre coût, qui donne tous les éléments nécessaires à un exploitant agricole pour prendre la décision d'optimiser son contrat d'après les factures dont il dispose. Dans le Gharb une campagne de mesures/informations sur la réserve en eau utilisable du sol permettrait dans bien des cas de réduire les volumes des apports au niveau d'une dose effectivement utile aux cultures.

7.4.4 Mise en place du suivi et de l'accompagnement

A l'issue de la phase de diagnostic et de restitution des résultats, le suivi et l'accompagnement constituent une deuxième phase nécessaire à la valorisation des résultats du programme.

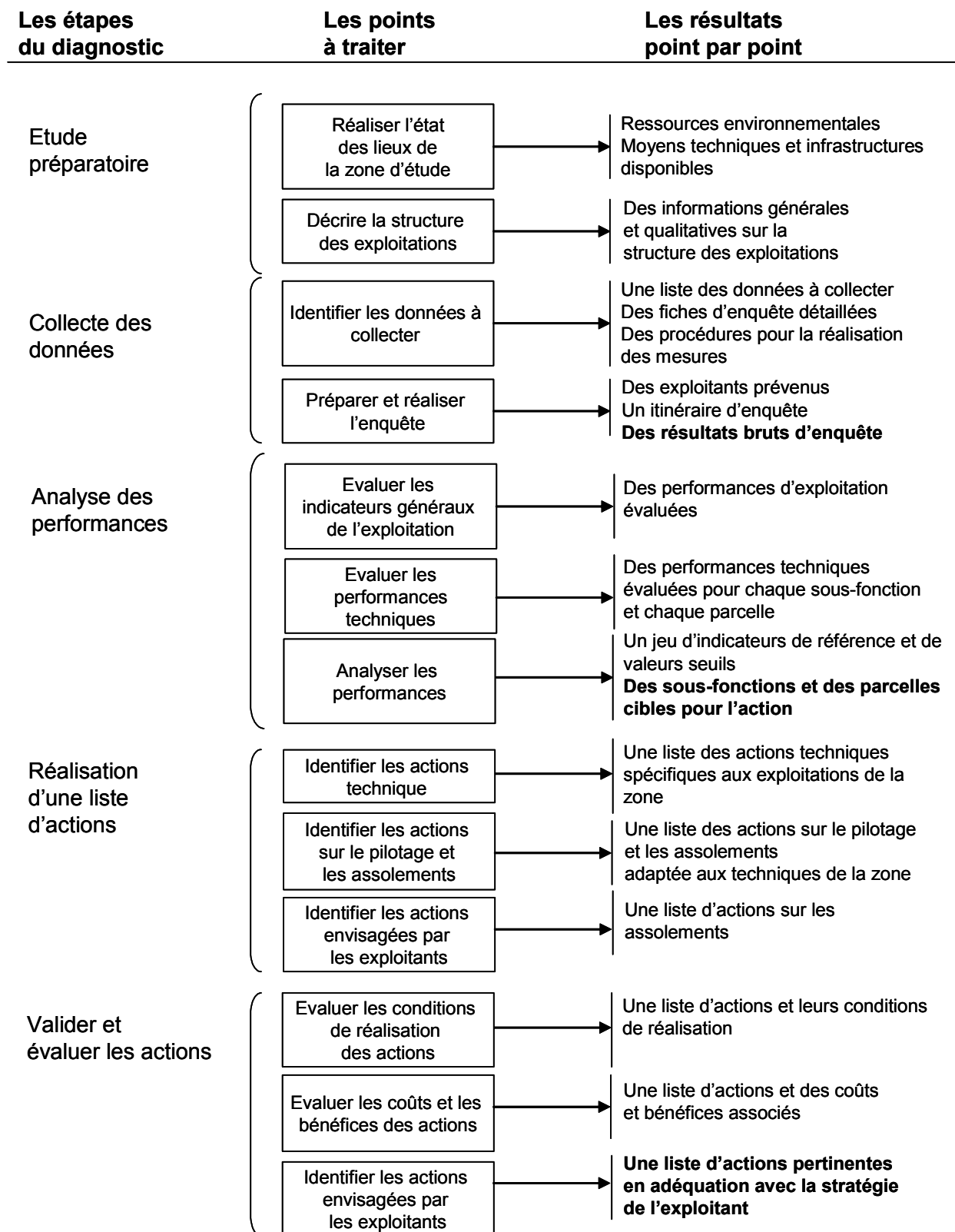
En effet, comme nous le verrons dans le chapitre suivant, la réalisation des interventions sur les infrastructures et l'évolution des pratiques de l'irrigation impliquent le plus souvent des compétences techniques auxquelles les exploitants ne sont pas formés. Ces compétences peuvent soit être acquises par les exploitants, soit être développées à l'échelle locale dans le cadre d'unités techniques spécifiques au sein des organisations d'agriculteurs.

Dans ce cadre, le suivi et l'accompagnement ont pour but de soutenir la réalisation technique des actions en apportant les compétences et l'expertise nécessaires à leur réalisation. En outre cette démarche peut intégrer la réalisation d'enquêtes périodiques permettant d'évaluer l'efficacité réelle des actions recommandées et engagées.

La mise en place du suivi et de l'accompagnement peut être menée en deux phases : une phase d'accompagnement et de validation des actions recommandées sur des exploitations pilotes, et une phase de suivi et d'accompagnement de la diffusion des actions validées dans la zone.

La seconde phase de diffusion des actions validées correspond à un renforcement du programme. Dans cette phase, les moyens en termes de ressources humaines de l'équipe opérationnelle du programme de diagnostic ne sont plus suffisants et il apparaît indispensable de développer des réseaux de techniciens et des réseaux de formation adaptés aux actions soutenues dans le cadre du programme.

Figure 8- 1 - Diagramme de la démarche générale de l'auditeur



8 Démarche de diagnostic eau – énergie de l'exploitation

Ce chapitre rassemble les principaux éléments méthodologiques à prendre en compte pour mener à bien le diagnostic « eau-énergie » à l'échelle de l'exploitation. Ces éléments pourront permettre pour les besoins d'un programme de diagnostic d'élaborer **un guide à l'attention de l'auditeur et du groupe de suivi** du programme de diagnostic.

Comme souvent indiqué, ce diagnostic a pour objectif essentiel de fournir à l'exploitant agricole une analyse objective des infrastructures et de l'utilisation qui en est faite et de proposer des actions adaptées à la structure de l'exploitation pour améliorer ces performances.

Cette proposition s'appuie sur **une approche expérimentale du diagnostic** eau – énergie mise au point lors des expériences réalisées, et tout spécialement des études menées en Lot-et-Garonne en 2003, puis en 2004 dans la région du Gharb, cette dernière intégrant d'ailleurs certaines observations méthodologiques tirées de l'étude menée en 2003.

L'approche est qualifiée d'expérimentale dans la mesure où sa portée s'est limitée à un petit nombre d'exploitations (19 en Lot-et-Garonne et 13 dans le Gharb). Les observations faites et les difficultés rencontrées à l'occasion de ses deux campagnes et du traitement des données qui s'en est suivi ont été mises à profit pour élaborer le présent travail.

Comme nous l'avons indiqué, le diagnostic proposé se décompose en une étape d'étude préparatoire et une étape de diagnostic approfondi. Les résultats de **l'étude préparatoire** aident à préparer et structurer le **diagnostic approfondi**. Cette deuxième étape permet de décrire dans le détail des performances des infrastructures, du pilotage de l'irrigation et la pertinence des choix d'assolement. Le niveau de précision recherché dans le diagnostic approfondi permet également d'évaluer les coûts, les bénéfices et les conditions de mise en œuvre des actions d'amélioration les plus adaptées à la structure de l'exploitation.

Pour ces deux étapes, on propose de décrire les principaux aspects à prendre en compte lors de la collecte de données. Ensuite, l'évaluation proposée des performances est basée sur une batterie d'indicateurs structurés autour des éléments clés à prendre en compte pour le déclenchement d'actions. Les deux dernières sections de ce chapitre sont consacrées à l'établissement d'une liste des actions pour l'amélioration de la pratique de l'irrigation et à l'évaluation de ces actions et de leurs conditions de mise en œuvre.

8.1 L'étude préparatoire, une étape pour structurer la collecte de données

L'étude préparatoire proposée se décompose en un état des lieux de la zone d'étude et une description des structures d'exploitations. Elle permet de remplir deux objectifs bien distincts :

- l'évaluation des contraintes physiques et technico-économiques, propres à la zone,
- la préparation du diagnostic approfondi en se basant sur des informations générales concernant la structure des exploitations.

Ce travail peut être complété par un audit préalable d'exploitation, se basant sur des informations facilement accessibles, et permettant de fournir aux exploitants une série d'indications sur les performances de leurs exploitations.

Encadré 8-1 - Contraintes et tarifs de l'utilisation des réseaux collectifs gravitaires dans le Gharb

Il y a plusieurs éléments contraignant dans l'accès à l'eau dans les réseaux collectifs gravitaires du Gharb. Ces contraintes, liées à l'organisation des tours d'eau, ont une influence forte sur la qualité du pilotage et de la conduite de l'irrigation.

Tout d'abord, les irrigants doivent faire une demande d'allocation auprès de l'**aiguadier** une fois par semaine. En termes de pilotage, cela implique que les exploitants doivent être en mesure d'anticiper les besoins en eau de leur culture. En outre, lorsque la demande d'allocation est faite, il n'y a pas de possibilité de revoir à la baisse le volume qui sera délivré sur une parcelle ni même d'en détourner une partie vers d'autres parcelles. De plus, les volumes attribués le sont par tranche de deux heures d'irrigation à débit fixe de 20 ou 30 l/s suivant les groupes d'exploitation. Il en résulte un manque de précision dans les apports. Enfin, une partie des allocations sont attribuées pour la nuit. Les exploitants se plaignent du fait que les irrigations de nuit soient attribuées indifféremment pour des cultures délicates ou pour des cultures plus faciles à irriguer. Ils réclament que les allocations de nuit soient réservées à la culture de la canne à sucre qui ne demande pas un travail de précision dans la répartition des débits.

Il semble, vu de l'extérieur, qu'une partie de ces problèmes pourraient être résolus en favorisant un travail de concertation entre les exploitants, d'une part, et entre les exploitants et l'aiguadier, d'autre part.

Les tarifs de l'eau facturée par l'Office Régional de Mise en Valeur des terres Agricoles du Gharb varient suivant le type de réseau (gravitaire, aspersion, privée), avec une distinction pour l'irrigation du riz dans le cas de l'irrigation gravitaire. Le taux d'équilibre correspond aux charges fixes d'aménagement et d'entretien du réseau. La taxe de pompage est liée aux coûts de fonctionnement, elle intègre notamment le coût énergétique du pompage et de la mise en pression dans le cas des réseaux dédiés à l'irrigation par aspersion.

Tableau 8-1- Détail des tarifs de l'eau pour les utilisateurs du réseau collectif et taxes dans le cas du pompage privé (Gharb au Maroc) - 2003

Prix en dh* / m ³	Irrigation gravitaire		Irrigation par aspersion	Pompage privé
	Riz	Autre		
Taux d'équilibre	0,22	0,22	0,22	0,22
Taxe de pompage	0,06	0,06	0,26	0
Prix Total du m ³	0,28	0,28	0,48	0,22
Coefficient	0,8	1	1	0,3
Prix total ajusté	0,224	0,28	0,48	0,066

* dh 1 dirham = 0,1 €

Remarque concernant le volume facturé :

- (i) dans le cas des prélèvements en réseau collectif tout volume réellement utilisé est facturé au prix total ajusté. Si l'exploitant utilise moins de 15000 m³ par an la différence entre les 15000 m³ et le volume prélevé est facturé au taux d'équilibre
- (ii) Pour les prélèvements privés le volume facturé est forfaitaire (6500 m³ variable probablement indexé sur le climat)

8.1.1 Etat des lieux de la zone

La première phase de l'étude préparatoire consiste à établir un état des lieux des **contraintes physiques et technico-économiques** de la zone. Il s'agit de définir des valeurs de références propres à la zone en ce qui concerne les besoins en termes de résultats de production et en termes d'irrigation, d'une part, et les ressources et moyens disponibles pour satisfaire ces besoins, d'autre part.

Pour se faire une idée des besoins en termes de résultats de production, on cherche à regrouper des informations statistiques sur la taille des exploitations, les cultures pratiquées, les marchés sur lesquels se positionnent les producteurs et le niveau de revenu généré au sein des exploitations. Il s'agit, ensuite, de définir dans quelle mesure les exploitants recherchent plutôt une augmentation des rendements, une stabilité de la production, ou une amélioration des revenus. Ces réflexions préliminaires sont utiles pour identifier les différentes stratégies des exploitants sur la zone.

Concernant les besoins de l'irrigation, on réalise dans un premier temps une estimation des besoins en eau de référence des principales cultures pratiquées, compte tenu des données climatiques. Ces besoins de référence permettront d'estimer l'efficacité globale de la pratique de l'irrigation. On cherche également à estimer les besoins de l'agriculture irriguée en termes de moyens :

- infrastructure pour la mobilisation des ressources en eau (forage, réserves d'eau, réseaux, ...),
- infrastructure de distribution d'énergie,
- compétences techniques pour la mobilisation des ressources et pour la pratique des apports au niveau des exploitations et des parcelles.

Les potentialités de production de la zone pour satisfaire ces besoins s'expriment d'abord en termes de **ressources environnementales disponibles** (ressources en eau et en sol). Concernant les ressources en eau, on cherche à déterminer pour chaque type de ressource :

- la disponibilité en volume pour l'irrigation, pour chaque mois de l'année,
- l'accessibilité économique (investissement pour accéder à la ressource) et physique (éloignement, différence de hauteur entre la ressource et la parcelle),
- le taux de mobilisation.

On répertorie également les principaux réseaux collectifs d'irrigation présents en essayant de caractériser le service rendu aux exploitants en termes de disponibilité de la ressource, de coût et de contrainte d'accès. S'agissant des sols, un recensement des principaux sols cultivés et de leur réserve utile permettra de définir des valeurs guides pour le choix des doses d'irrigation. Une recherche complémentaire peut être menée si des problèmes de salinité sont avérés. L'ensemble de ces informations portant sur les ressources en eau et sur les sols peut être reporté sur une carte de la zone.

Les potentialités de la zone dépendent également d'un deuxième volet qui s'exprime en termes de **d'infrastructures et de moyens techniques et économiques disponibles**. Un recensement des infrastructures, des organismes et des acteurs de la zone dans le domaine de l'irrigation permettra de caractériser ces potentialités de production. Voici les principaux points sur lesquels doit porter ce recensement :

- réseaux de distribution d'eau,
- réseaux et points de distribution d'énergie,
- principaux commerçants de matériel d'irrigation : pompes, moteurs, canalisations, asperseurs, ...,

Encadré 8-2 - Les ressources en eau et les aménagements dans la région du Gharb

La région du Gharb est située sur la partie aval du bassin versant de l'oued Sebou. L'oued Sebou et ses deux principaux affluents apportent environ 6 Gm^3 d'eau par an soit environ 27% des ressources de surface mobilisables au Maroc. Environ $0,9 \text{ Gm}^3$ sont stockés dans deux nappes souterraines. Les ressources pour le prélèvement privé sont des nappes souterraines peu profondes, et les cours d'eau. Dans la zone côtière, la profondeur des nappes souterraines est faible (de 5 à 15 m), elle augmente en se déplaçant vers l'Est (jusqu'à 40 m en moyenne).

La zone est pourvue de 19 barrages (capacité de stockage totale 6 Gm^3) et des infrastructures hydrauliques (3000 km de réseau, 51 stations de pompage) nécessaires à l'irrigation des 107 800 ha équipés sur les périmètres du Beth, de la première et de la deuxième tranche d'irrigation. Une troisième tranche est en court d'aménagement pour l'équipement en infrastructures d'irrigation sur 95000 ha. 69 % des surfaces sont équipées pour l'irrigation à la raie, 13 % pour l'irrigation par submersion (culture du riz) et 18% pour l'irrigation par aspersion. Cependant les aménagements sont le seul fait de l'Etat qui en est le garant et le gestionnaire. Des organismes nommés Offices Régionaux de Mise en Valeurs des terres Agricoles sont dédiés à la gestion de ces aménagements. Ces organismes ont notamment la charge d'assurer la facturation de l'eau et le recouvrement des coûts.

Encadré 8-3 - Comparaison entre la structure des exploitations dans le Gharb et dans le Lot-et-Garonne

Dans la région du Gharb, on distingue principalement deux types d'exploitations irriguées :

- (i) les exploitations qui s'inscrivent dans le cadre de la réforme agraire, assez homogènes (taille, cultures pratiquées) et bénéficiant des réseaux collectifs d'irrigation,
- (ii) les exploitations où l'irrigation d'initiative privée est le plus souvent dédiée à des cultures à forte valeur ajoutée (arboriculture, cultures maraîchères).

Ces deux structures d'exploitation présentent des différences significatives en termes de stratégie d'exploitation, de techniques mises en œuvre et de problématiques de développement. Il semble, dans le cas du Gharb, que l'élément déterminant soit le mode d'accès à l'eau.

En revanche, pour le Lot-et-Garonne, le mode d'accès à l'eau est beaucoup moins déterminant. En effet, dans ce cas, les réseaux collectifs sont mis en œuvre par des groupements d'exploitants ou des opérateurs privés. En outre les ouvrages collectifs sont des réseaux sous pression dimensionnés pour être utilisés à la demande de sorte que le service est pratiquement équivalent à un système propre à l'exploitation. En Lot-et-Garonne, ce sont essentiellement les choix de production qui orientent l'ensemble de la structure de l'exploitation. On distingue principalement deux types de structures d'exploitation : les exploitations centrées sur les grandes cultures et la production de semences utilisant principalement des systèmes d'irrigation par aspersion et les exploitations centrées sur la production de cultures à forte valeur ajoutée (cultures maraîchères et arboriculture) utilisant des systèmes d'irrigation localisée souvent asservis par des automates et couplés à des systèmes de fertilisation. Dans le cas des grandes cultures, la question du coût énergétique est très sensible alors qu'elle apparaît marginale dans le cas des cultures à forte valeur ajoutée.

Cette comparaison met en évidence deux situations contrastées. Dans la région du Gharb, c'est le type d'accès à la ressource en eau qui conditionne fortement le mode d'irrigation possible et le choix des cultures. Alors que dans le département du Lot-et-Garonne les choix de culture déterminent les moyens à mettre en œuvre en termes de mobilisation des ressources et de système d'irrigation.

- organisation et association d'agriculteurs, départements d'appui technique, ...,
- stations météorologiques,
- banques de crédits pour les projets agricoles.

Ces informations, collectées à l'occasion de l'état des lieux de la zone, et complétées par une liste de tarifs pour les différents biens et services commercialisés localement, seront utiles pour l'évaluation de la faisabilité et du coût des actions d'amélioration qui pourraient être proposées pour l'irrigation au niveau des exploitations.

8.1.2 Structure des exploitations et des systèmes d'irrigation

Cette deuxième phase a pour but de définir les principaux éléments descriptifs de la structure des exploitations en vue de **préparer les dossiers d'enquête**. Pour ce faire, on peut se baser sur **des travaux de recherches et d'évaluation déjà réalisés** sur la zone et compléter si nécessaire ces résultats par une enquête rapide effectuée par téléphone ou par courrier auprès des exploitants.

Au cours de cette phase, les informations recherchées doivent être des valeurs opérationnelles connues de l'exploitant et qui ne nécessitent pas de recours à des documents de comptabilité, à des mesures ou à l'élaboration d'une approche détaillée et fastidieuse. Quelques déplacements effectués sur la zone d'étude peuvent aussi être utiles pour se faire une idée de la représentativité des différentes techniques d'irrigation utilisées.

Il ne s'agit pas au niveau de l'étude préparatoire de décrire des aspects quantitatifs de l'irrigation mais plutôt de décrire les modalités techniques de mobilisation des ressources et de répartition de l'eau sur les exploitations et les parcelles. On propose de décrire ces modalités pour les points suivants :

- les ressources en eau,
- le pompage,
- le stockage de l'eau,
- la distribution de l'eau entre les parcelles,
- la répartition de l'eau sur les parcelles,
- les cultures (calendrier, utilité de la production au sein de l'exploitation et éventuellement surfaces).

A l'issue de cette enquête qualitative et en s'appuyant sur l'état des lieux de la zone, on définit quelques références représentatives des structures d'exploitation. Le type d'accès à l'eau (privé, collectif), la taille des exploitations (surface et mobilisation de main d'œuvre salariée) et le type de culture (grande culture, culture à forte valeur ajoutée) semblent être trois éléments pertinents pour établir une typologie des structures d'exploitations.

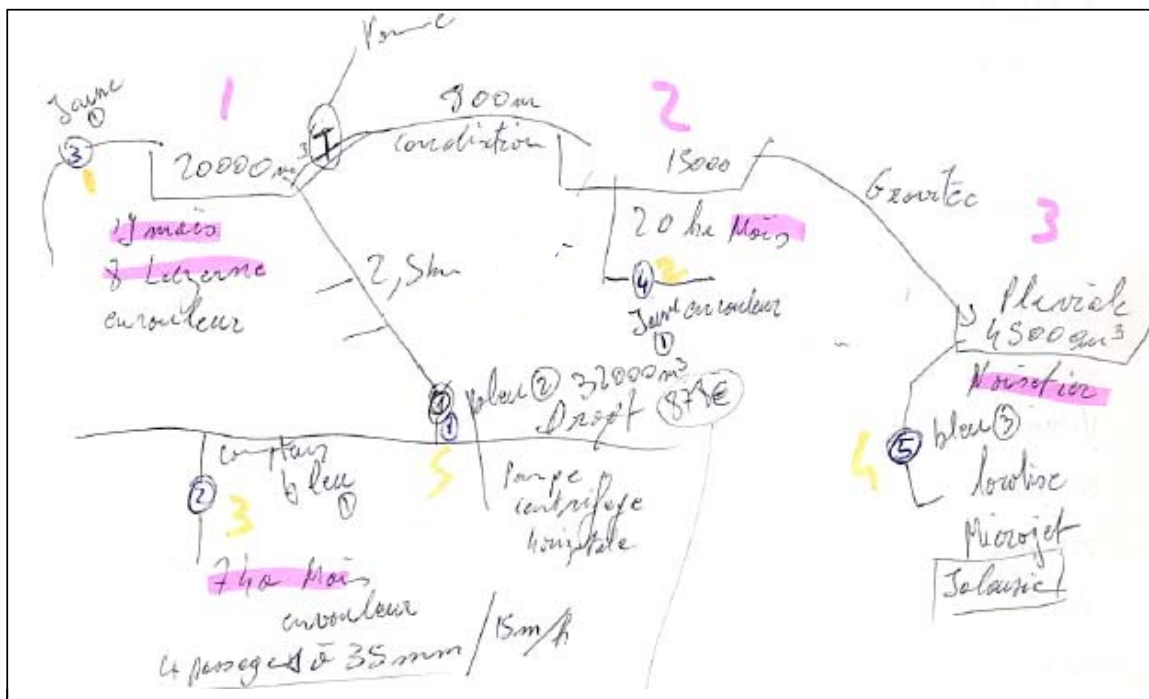
8.2 La collecte des données pour le diagnostic approfondi

Cette étape de collecte de données, que l'on appellera également « étape d'enquête », est la partie centrale du diagnostic de l'exploitation. C'est l'étape qui mobilise le plus de ressources en termes de moyens financiers et humains et sur laquelle repose la qualité de l'évaluation et des propositions d'action. On se propose de décrire les données qu'il convient de collecter et les étapes clés de l'enquête en termes de préparation et de réalisation.

Figure 8- 2 - Schéma d'exploitation réalisé par un exploitant du Gharb



Figure 8- 3 - Schéma de réseau réalisé avec l'aide d'un exploitant du Lot-et-Garonne



8.2.1 Les données à collecter pour le diagnostic approfondi

Pour valoriser au maximum la durée disponible pour l'enquête, il convient de bien identifier a priori les informations nécessaires et de définir un enchaînement cohérent pour poser les questions aux exploitants. En effet, en plus du coût du temps passé par l'enquêteur, il faut tenir compte de la disponibilité de l'exploitant et du fait que, paradoxalement, plus l'enquête aura tendance à se prolonger, plus le risque d'obtenir des réponses imprécises de la part de l'exploitant sera important.

On propose d'organiser la collecte des données autour de six volets suivants :

- données générales de l'exploitation,
- données techniques et économiques,
- description du mode de pilotage des apports en eau,
- factures d'eau et d'énergie,
- mesures pour la caractérisation des performances eau-énergie,
- interrogations, démarches et stratégies de l'exploitant.

Données générales sur l'exploitation

Ce premier volet permet tout d'abord de situer géographiquement l'implantation de l'exploitation. Les zones de cultures sont repérées sur une carte et un **schéma d'implantation** de l'exploitation est tracé. Ce schéma est un outil décisif de la démarche d'audit, il permet d'établir un lien entre l'auditeur et l'exploitant. Dans toutes les discussions ultérieures portant sur des aspects techniques, le schéma d'implantation pourra être utilisé par l'auditeur ou l'exploitant pour recadrer la discussion ou dissiper des malentendus. Le schéma d'implantation est un support d'autant plus approprié que, généralement, les agriculteurs ont une assez bonne représentation de l'exploitation dans l'espace. Le schéma doit de préférence être dessiné par l'exploitant lui-même et peut faire l'objet d'annotations de l'enquêteur (Figure 8- 2 et Figure 8- 3). Les informations à reporter sur le schéma sont dans un premier temps le positionnement de la ferme, des routes et des chemins. Ensuite, on trace sur le schéma le contour de l'ensemble des parcelles cultivées et on y reporte les dimensions et les surfaces de ces dernières. Les parcelles peuvent être repérées par des noms ou des numéros à la convenance de l'exploitant. Enfin on repère les points d'accès à l'eau, les stations de pompage, les réseaux de distribution de l'eau entre les parcelles, s'il y a lieu les réservoirs d'eau et les points de comptage de l'eau et de l'électricité.

On identifie ensuite les **principales sources de revenu** de l'exploitation en réalisant un inventaire sommaire des principales productions de l'exploitation (y compris la production animale s'il y a lieu) et des surfaces mobilisées correspondantes en essayant d'évaluer en première approximation la part de chacune des productions dans le chiffre d'affaires. On intègre en outre les revenus indirects perçus par les exploitants sous forme d'aides et de subventions. Ces questions conduisent naturellement à décrire la **stratégie de développement** de l'exploitant en termes d'évolution de la surface cultivée, de modification de l'activité productive, d'aménagement des infrastructures et de maîtrise des coûts de production et d'irrigation.

Dans le cas où l'étude préparatoire n'aurait pas permis de situer la part des charges d'irrigation parmi l'ensemble des **charges de production**, il est utile de décrire sommairement ces charges et d'en évaluer les importances relatives. Ces informations permettront notamment de se faire une idée de l'intérêt que peut porter l'exploitant à la démarche de maîtrise des coûts associés à l'irrigation.

Tableau 8-2 – Description générale de 16 exploitations du Lot-et-Garonne parmi les 19 qui ont participé à l'enquête

N° Exploit	Cultures pratiquées	Surface cultivée	Volume total prélevé	Prélèvement par unité de surface	Ressource(s) en eau utilisée(s)	Techniques utilisées pour la répartition de l'eau sur la parcelle
		ha	m ³ /saison	m ³ / ha / saison		
3	Betteraves (semence), carottes (semence), choux (semence), maïs, melons, poireaux (semence), sorgho	15,7	11600	739	Lac collinaire	Enrouleur
8	Maïs, soja, sorgho	50	57000	1140	Lac collinaire	Enrouleur
9	Cerises, kiwis, noix, poires, pommes	34	80800	2376	Puits	Localisée, couverture intégrale
12	Betteraves (semence), tabac	5,6	6248	1116	Réseau collectif	Enrouleur
15	Cerises, pêches, pommes, prunes	2,4	4890	2038	Réseau collectif	Localisée, couverture intégrale
16	Cerises, kiwi, pêches, pommes	25,61	38652	1509	Réseau collectif	Localisée, couverture intégrale
17	Fraises, melons, maïs, pommes, prunes	39,9	48780	1223	Réseau collectif, puits, rivière Lot	Enrouleur, localisée
18	Noisettes, prunes	31	30760	992	Lac collinaire, puits	Localisée, couverture intégrale
22	Maïs, noix, prunes, tabac	61,2	88880	1452	Réseau collectif, rivière Lot	Enrouleur, localisée, couverture intégrale
24	Luzerne, maïs, noisettes	82	92120	1123	Lac collinaire, rivière Lot	Enrouleur, localisée
26	Maïs	26	39000	1500	Rivière Dourdène	Enrouleur, couverture intégrale
27	Maïs, maïs doux	33	51580	1563	Rivière Dropt	Enrouleur
28	Betteraves (semence), maïs (semence)	18	33750	1875	Ruisseau avec lac	Enrouleur
30	Kiwi, maïs, tabac	55,53	56295	1014	Rivière Garonne, puits, réseau collectif	Enrouleur, couverture intégrale
32	Betteraves (semence), haricots verts, maïs, tabac	50,5	94150	1864	Canal, puits	Enrouleur
34	Maïs, pêches, pommes, tabac	9,95	22774	2289	Réseau collectif, puits	Enrouleur, localisée, couverture intégrale

Encadré 8-4 - Les raisons énergétiques de la différence de tarif de l'eau entre réseau gravitaire et sous pression dans les réseaux collectifs du Gharb

Dans le détail de la facture du m³ d'eau appliquée aux deux modes de distribution de l'eau dans le Gharb on observe que la taxe de pompage est nettement plus élevée dans le cas des réseaux sous pression (0,26 dh / m³ contre 0,06 dh/m³ en distribution par canaux) (Tableau 8-1). La taxe de pompage correspond au coût énergétique du pompage. Dans le cas de la distribution sous pression, la pression au niveau de la station de pompage s'élève à 74 m alors qu'elle n'est que de 10 m dans le cas des réseaux de distribution par canaux. Cette différence de pression se traduit directement par une différence significative de la demande en énergie utile et en énergie finale par m³ pompé. Compte tenu du tarif de l'électricité qui s'élève à 0,49 dh / kWh pour ce type d'utilisation (source : ONE), et du rendement des pompes (que l'on estime à environ 50%) on en déduit le coût de l'électricité du pompage d'un mètre cube varie entre 0,20 dh en réseau sous pression et 0,03 dh en réseau gravitaire.

Les charges à prendre en considération sont les suivantes :

- accès au foncier,
- semences et plants,
- engrais et pesticides,
- amortissement du matériel et des locaux,
- salaires,
- énergie.

Données techniques et économiques

On propose de décrire dans le détail les données techniques à collecter en les regroupant autour des aspects suivants :

- cultures, parcelles et calendrier de culture,
- ressources en eau,
- stockages et réservoir d'eau,
- groupe de pompage,
- réseau de distribution,
- système de répartition de l'eau sur les parcelles.

Plusieurs techniques peuvent être mises en œuvre pour réaliser les fonctions de pompage, de distribution, et de répartition de l'eau sur les parcelles. Les différences entre ces techniques étant souvent significatives, on propose d'élaborer des fiches d'enquêtes propres à chaque technique. Dans la mesure où, pour une zone donnée, toutes les techniques existantes ne sont pas nécessairement mises en œuvre, on s'appuie sur les résultats de l'étude préparatoire pour identifier les fiches techniques à préparer pour la réalisation de l'enquête.

Pour certains aspects techniques, l'enquête peut être complétée par la réalisation d'observations directes ou de mesures. C'est notamment le cas pour la caractérisation des systèmes de répartition de l'eau sur les parcelles, pour le réseau de distribution et pour le pompage. La procédure à mettre en œuvre est détaillée dans le paragraphe suivant portant sur les mesures.

Cultures, parcelles et calendrier de culture

Dans un tableau de description des cultures, sont reportés : la variété, la densité de plantation en nombre de pieds par hectare, les rendements moyens obtenus (et leur variabilité pour les cultures pluviales), les prix de vente, le type d'acheteur et les primes, quotas et obligations de production éventuelles. Lorsque les récoltes ne sont pas vendues, l'auditeur questionne l'exploitant sur leur rôle dans le fonctionnement de la ferme. Les parcelles sont décrites séparément par leur surface, le type de sol et la réserve utile du sol. Afin de localiser les besoins en eau en fonction du temps, on réalise un calendrier de culture pour chaque parcelle. Idéalement, ce calendrier s'échelonne sur les trois dernières années d'exercice.

Ressources en eau

Pour chaque accès à l'eau, l'auditeur renseignera les champs suivants : origine, qualité (salinité, besoin en filtration), profondeur d'accès ou pression disponible, limite en termes de débit, limite en termes de volume, contrainte de planification des apports (nécessité de programmer les apports – nombre de jours entre deux demandes d'allocation), volumes minimum et maximum par apport, tarifs d'accès (réseau collectif) et de mobilisation (redevance ou taxe de prélèvement) de la ressource.

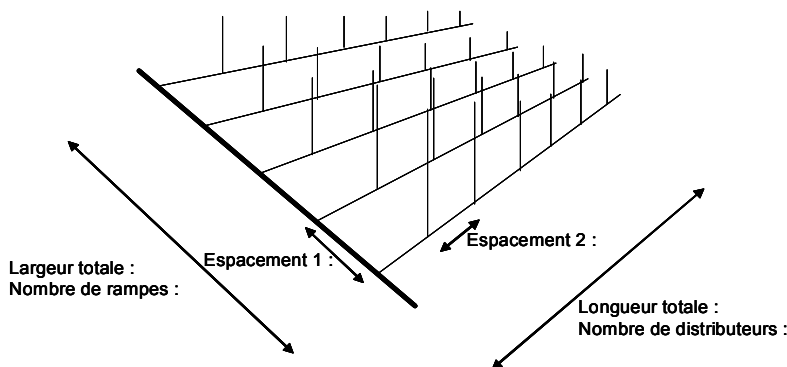
Encadré 8-5 - Exemple de fiche pour la collecte de données concernant la description des systèmes – description du système d'irrigation par aspersion en couverture intégrale (fiche élaborée et utilisée pour les enquêtes réalisées en Lot-et-Garonne)

Fiche N° : Irrigation par quadrillage d'asperseurs (couverture intégrale)

Système N° : _____ Parcelles concernées : _____

1) Dimensions

Surface installée : _____ ha



Nombre de rampes alimentées simultanément (secteur) :

Pilotage automatique Oui Non

Diamètre des portes rampes : mm

Diamètre des rampes : mm

Matériau utilisé :

2) Description des asperseurs

Marque : _____ Modèle : _____

Pression nominale de fonctionnement : bar

Débit nominal d'un distributeur :

Débits et pression mesurés

Chemin hydraulique le plus favorable - Débit : m³/ h Pression : bar

Chemin hydraulique le plus défavorable - Débit : m³/ h Pression : bar

Portée nominale du jet : m

Diamètre des buses : mm

Hauteur des distributeurs par rapport au sol : m

3) Coûts associés

Montant de l'investissement : € Date : _____

Subvention Oui Non Montant : _____ Source : _____

Estimation du coût annuel des réparations et des remplacements :

Besoins en ressources humaines :

Pour l'installation : heures et la désinstallation : heures

Pour l'apport d'une dose (démarrage de la pompe, manipulations récurrentes) : heures

Pour l'entretien :

4) Autres

Utilisation pour l'antigel : Oui Non Exclusivement pour l'antigel

Une deuxième partie de la description des ressources est consacrée aux ressources disponibles non mobilisées par l'exploitation agricole et à l'identification des freins à leur utilisation. Cette partie pourra être développée notamment dans le cadre de démarches de développement de l'irrigation.

Stockage et réserve d'eau

Les ouvrages de stockage de l'eau au niveau de l'exploitation sont répertoriés et caractérisés par les informations suivantes : origine de l'eau, volume, revêtement, coût d'investissement, subvention.

Réseau de distribution

La description du réseau doit permettre de calculer les pertes de charge (canalisation sous pression) et les pertes en eau (fuite dans les réseaux sous pression et infiltrations dans les canaux ouverts). Pour réaliser cette estimation il convient de déterminer la longueur, la section (forme et dimensions) et le matériau ou le revêtement de chaque portion du réseau depuis la ressource en eau jusqu'à la parcelle. Il faut également évaluer la différence de niveau entre la parcelle et la ressource en eau. Par ailleurs, on cherche à estimer le coût des investissements pour la construction du réseau (génie civil et matériel).

Dans certains cas, la qualité de l'eau peut occasionner un colmatage des canalisations se traduisant par de fortes pertes de charge. Ce problème peut être repéré en comparant les pertes de charge mesurées et calculées dans les différentes portions du réseau.

Systèmes de répartition de l'eau sur les parcelles

La dernière étape du cheminement de l'eau d'irrigation vers la plante est sa répartition sur la parcelle. Dans des conditions idéales le système de répartition a, comme nous l'avons vu (§ 3.3), pour fonction d'apporter un volume d'eau identique à chaque plante de la parcelle.

Dans cette partie de l'audit, il s'agit de repérer les principales caractéristiques du système de répartition de l'eau sur la parcelle. Dans un premier temps l'auditeur détermine la famille de système utilisée et se reporte au questionnaire correspondant. Dans tous les cas, un nouveau schéma sera établi à l'échelle de la parcelle afin de représenter la disposition du système.

Dans le cas des **techniques d'irrigation gravitaire**, l'auditeur, sous le contrôle de l'exploitant, reporte sur le schéma les dimensions des raies ou des planches (longueur, largeur, profondeur), la position des plantes, et l'arrivée d'eau sur la parcelle. Il estime la pente et la qualité du nivellement (existence de cuvettes, ou de zones mal approvisionnées) et repère les accessoires mis en œuvre pour la répartition de l'eau (gaine souple, siphons, rampe à vannettes,...), leurs caractéristiques et leur prix d'achat.

Dans le cas des **techniques d'irrigation sous pression** (par aspersion ou localisée), des informations complémentaires sont requises. Ce sont les caractéristiques du matériel utilisé (marque, modèle, débit, pression nominale, portée du jet, section et longueur des différentes portions du réseau de répartition, caractéristiques du filtre, fournisseur, prix d'achat des systèmes). Dans le cas des réseaux d'irrigation localisée, on pourra effectuer quelques mesures de débits sur différents goutteurs afin de valider les données de conception et de vérifier de façon sommaire l'homogénéité de répartition des apports sur la parcelle. Pour les systèmes d'irrigation mobiles utilisant une force motrice l'auditeur notera les caractéristiques des éléments moteurs (perte de charge générée pour les turbines des enrouleurs, puissance électrique pour la motorisation des trains de roues des rampes et des pivots).

Tableau 8-3 – Principales informations à collecter pour la caractérisation des systèmes de répartition de l'eau sur la parcelle utilisant six techniques (irrigation à la raie longue et courte – robta -, irrigation par couverture intégrale, par canon à enrouleur, irrigation localisée utilisant des ajutages de type Bas Rhône Languedoc et goutte à goutte)

Famille	Gravitaire		Aspersion		Localisé	
	Technique	Raie longue	Raie courte	Couverture intégrale	Canon à enrouleur	Bas Rhône
Surface couverte	parcelle		par secteur	par passage	par secteur	
Dimensions caractéristiques						
<i>Ecartement</i>	entre les raies		entre asperseurs	entre deux passages	entre deux rampes	
<i>Longueur</i>	des raies		des secteurs	du flexible	des rampes	
<i>Pente du terrain</i>	profondeur des raies		diamètre des rampes	diamètre du flexible	diamètre des rampes	
	dans la direction des raies et perpendiculairement aux raies		(différence de hauteur max entre l'arrivée d'eau et le point le plus défavorable sur la parcelle)			
Distributeurs (de la bouche d'irrigation au système)						
<i>Technique</i>	Siphons, rampe à vannettes, ...	segua en terre, gaine souple	canalisations enterrées ou aériennes	nombre de canalisations mobiles	canalisations enterrées ou aériennes	
<i>Matériaux</i>	revêtement du distributeur et des seguias		des canalisations (de la bouche d'irrigation aux rampes ou à l'enrouleur)			
<i>Remarques</i>	dégradations, gênes occasionnées, main d'oeuvre pour l'entretien et la manipulation					
Caractéristiques débit - pression						
<i>Débits des distributeurs finaux et écarts de débits</i>	en début des raies		des asperseurs	du canon	des ajutages	des goutteurs
<i>Pression requise et disponible</i>	pour les rampes à vannettes	pour l'alimentation des gaines souples	aux asperseurs en fonction de la position	à l'arrivée dans l'enrouleur et au canon	aux ajutages et aux goutteurs en fonction de la position	
	Nombre de distributeurs finaux desservis simultanément					
Conduite de l'irrigation						
<i>Autres</i>	réseau de colature*		doses minimum et maximum praticables et pratiquées	automatisation	pratique en bout de champ et réglage de vitesse	automatisation, fertigation
Besoins en ressources humaines						
<i>Mise en route annuelle</i>	planage		installation / désinstallation	entretien	vérification des distributeurs, installation / désinstallation	
<i>Pour chaque apport</i>	conduite		manipulation des vannes	déplacement et mise en œuvre de l'enrouleur	manipulation des vannes et nettoyage des filtres	
Coûts associés						
<i>Moyen terme</i>	rampe, siphons, ...		asperseurs, canes, réseau, accessoires	canon, enrouleur, électronique	réseau, installation fixe, filtre, accessoires	
<i>Annuels</i>	planage	gaine souple		entretien et réparations	distributeurs jetables	

* réseau de colature : réseau de canaux, le plus souvent en terre, utilisé pour évacuer le surplus d'eau d'irrigation en bout de raie

Enfin l'auditeur cherche à estimer avec l'exploitant le temps de travail nécessaire à la mise en œuvre et à l'utilisation des systèmes (mise en place et vérification des réseaux, entretien, mise en route, surveillance et réglages, alimentation en énergie des groupes de pompage qui utilisent du carburant et de la main d'œuvre pour les systèmes gravitaires).

Compte tenu des différences importantes entre les différentes techniques utilisées, il nous a paru judicieux d'utiliser une fiche technique spécifique à chacune des techniques mises en œuvre. A titre d'exemple, les principales informations à collecter pour décrire six techniques assez communes sont détaillées dans le Tableau 8-3. La fiche technique proposée dans l'Encadré 8-5 est un exemple du type de fiche qui peut être utilisé pour la collecte des données lors du diagnostic approfondi.

Groupe de pompage

La description du groupe de pompage se fait grâce aux données dont dispose l'exploitant (documents techniques), aux observations effectuées directement sur le matériel et aux mesures de performance. Elle a pour but principal de déterminer si le groupe de pompage est adapté au circuit hydraulique constitué par les différents organes du système d'irrigation et d'évaluer le rendement énergétique du pompage.

Les principales informations à collecter pour ce faire sont les suivantes :

- **moteur** (marque, modèle, type de moteur, énergie finale utilisée, puissance nominale, année de mise en service, vitesse de rotation en régime nominal, fournisseur, prix d'achat),
- **transmission** entre le moteur et la pompe (poulie – diamètre côté moteur, diamètre côté pompe – arbre, directe, autre),
- **pompe** (type, marque, modèle, diamètre d'entrée, diamètre de sortie, gamme de fonctionnement débit-pression nominal, rendement nominal, vitesse de rotation nominale, fournisseur, prix d'achat),
- **compteurs** (repérage et caractéristiques du compteur d'eau et dans le cas d'une alimentation électrique du compteur d'électricité – le cas échéant, description des autres appareils électriques connectés au compteur et de leur puissance et plage de fonctionnement, redevance pour l'irrigation, facture pour l'eau en réseau collectif et facture d'électricité sur les trois dernières années d'exercice),
- **ou tout autre type d'élément d'information** correspondant à l'opération de pompage suivant d'autres techniques qui ne sont pas décrites ici (manège à traction animale, pompe à motricité humaine, pompe éolienne, pompe solaire).

En complément, l'auditeur cherche à savoir si l'exploitant a eu recours à une démarche particulière, ou a fait appel à une compétence extérieure pour dimensionner le groupe de pompage.

Description du mode de pilotage des apports en eau

La description du pilotage de l'irrigation comporte deux volets. Le premier reprend pour chaque culture les dates et les volumes des apports, parcelle par parcelle. Dans un second volet, une discussion avec l'exploitant doit permettre d'établir sur quels critères est prise la décision de déclencher une irrigation et comment est décidé le volume (ou la durée) des apports.

Encadré 8-6 - Les mesures à réaliser pour caractériser les performances énergétiques des pompes

La démarche consiste en une mesure de la puissance hydraulique produite par la pompe d'une part, et en une mesure de la consommation d'énergie finale par unité de temps (puissance finale appelée) consommée par le groupe de pompage, d'autre part.

Pour évaluer l'énergie hydraulique produite il faut mesurer d'une part la hauteur manométrique totale (HMT = pression en sortie de pompe + différence de niveau entre la pompe et le point de prélèvement) et d'autre part le débit.

Pour mesurer la puissance finale appelée, on réalise, suivant l'énergie finale utilisée, une mesure de la puissance au compteur électrique ou une mesure du débit de carburant. Cette dernière est le plus souvent une mesure de débit moyen (rapport entre le volume de carburant consommé et la durée de la mesure). Le rapport des deux puissances calculées à partir de ses mesures donne le rendement énergétique de la pompe.

On remarque qu'il est essentiel que les mesures réalisées sur les systèmes d'irrigation soient effectuées pour des conditions réelles de fonctionnement. Pour cela on vérifie auprès de l'exploitant que le système d'irrigation fonctionne, pendant la mesure, suivant les conditions habituelles d'utilisation.

Figure 8- 4 - Mesure de débit par débitmètre à ultrasons en sortie d'une pompe de 6 chevaux couplée par une courroie à un moteur diesel de 8 chevaux



Dans ce second volet, l'auditeur essaie d'estimer le niveau de formalisation de la méthode d'élaboration de la décision mise en œuvre par l'exploitant. Pour cela, il le questionne sur les outils et les indicateurs utilisés (données météorologiques, bulletins, tensiomètre, bilan hydrique, connaissance des caractéristiques du sol, observation de la végétation) et sur les valeurs seuils qui conduisent à la décision.

Factures d'eau et d'énergie

Des copies des factures d'eau (abonnement, consommation), des redevances, et des factures d'énergie lorsqu'elles sont disponibles, pour une ou deux années d'exercice, sont associées au dossier d'audit. Afin de ne pas perdre de temps, l'auditeur demande à l'exploitant de préparer ces documents au cours de l'entretien téléphonique de préparation. Chaque facture d'énergie doit être associée à une station de pompage par un identifiant et chaque facture d'eau doit être associée à une arrivée d'eau sur l'exploitation.

Dans le cas où l'énergie finale utilisée pour le pompage est du carburant, et si l'exploitant ne dispose pas de facture, on cherchera à estimer avec lui le coût d'une saison d'irrigation en utilisant ses repères habituels (volume de carburant acheté au cours d'une saison d'irrigation, pour l'apport d'une dose,...)

Mesures pour la caractérisation des performances eau-énergie

Au cours de la phase d'enquête, il peut être utile, voire nécessaire, de réaliser telle ou telle mesure sur le système d'irrigation. Le besoin s'en fait ressentir dans les situations suivantes :

- les factures d'eau et/ou d'énergie ne sont pas disponibles et/ou les performances eau énergie du système semblent mauvaises (mesure de débit, mesures des performances énergétiques du groupe de pompage (Encadré 8-6)),
- l'exploitant n'est pas en mesure de donner des informations précises sur les volumes des apports et des prélèvements effectués (mesures de débits et questions complémentaires sur les durées d'utilisation des systèmes),
- le mode de pilotage appliqué par l'exploitant ne semble pas adapté (mesures de débit, prélèvement de sol pour évaluation de la réserve utile),
- l'homogénéité de répartition ne semble pas très bonne (irrigation localisée, couverture intégrale, pivot).

Interrogations, démarches et stratégies de l'exploitant

Afin de compléter l'enquête et d'intégrer pleinement l'exploitant dans la démarche de diagnostic, l'enquêteur sera attentif pendant toute la durée de l'enquête aux attentes et aux suggestions de l'exploitant. Il notera en particulier les points suivants :

- attentes en termes de résultats du diagnostic,
- questions techniques,
- actions en cours et actions projetées au sein de l'exploitation,
- incertitudes et freins stratégiques identifiés par l'exploitant,
- implication dans des démarches collectives.

8.2.2 Préparation et réalisation de l'enquête

La période de préparatifs qui précède la collecte des données a pour but de régler l'ensemble des aspects pratiques pour assurer le bon déroulement de la collecte de données.

Encadré 8-7 - Diagnostic d'une installation à partir de plusieurs sources d'informations et de plusieurs méthodes d'évaluation – comment interpréter les résultats

On se propose de détailler la procédure d'évaluation des performances eau-énergie d'une exploitation en appliquant trois méthodes différentes. Pour les trois méthodes, l'évaluation de la demande en énergie utile spécifique (J/m^3) se base sur l'évaluation de la HMT. Dans le cas de l'exploitation étudiée, les caractéristiques du réseau, ancien, ne sont pas connues et seule la HMT a pu être évaluée à partir de la mesure de pression en sortie de pompe.

La première méthode pour estimer le rendement énergétique de la pompe, consiste à estimer la puissance utile du système en se basant sur l'énergie spécifique et le débit nominal et à prendre en compte la puissance nominale de la pompe. La deuxième méthode se base sur deux mesures instantanées pour la puissance (au compteur d'électricité) et le débit (au compteur d'eau). La troisième méthode se base sur la mesure de consommation d'eau et d'énergie sur une même période.

Tableau 8-4 - Analyse des performances eau énergie d'une exploitation de Lot-et-Garonne

		Méthode 1	Méthode 2	Méthode 3	Déductions	Remarques
Hauteurs manométriques						
Ressource	m	0	0	0	0	
Réseau	m	?	?	?	90	Le réseau de distribution génère des pertes de charge trop élevées
Canon	m	50	50	50	50	
Tuyau flexible	m	20	20	20	20	
Turbine enrouleur	m	10	10	10	10	
Total	m				170	
Total mesuré	m	170	170	170	170	
Total retenu	m	170	170	170	170	
Energie utile spécifique	J/m ³	1666000	1666000	1666000	1666000	
Débits et consommation d'eau						
Débit	m ³ /h	nominal	mesuré (compteur)		Estimation d'après les caractéristiques de la pompe	Défaillance probable du compteur d'eau
		50	23			
				mesurée (compteur) m ³		
Consommation d'eau	m ³			7000		
Puissance et consommation d'énergie						
Puissance utile	kW	23	11		16	
Puissance électrique	kW	nominale 34	mesurée 26		26	
Energie utile	GJ			11,7		
Energie utile (conversion)	kWh			3239		
Consommation d'électricité	kWh			mesurée (facture) 6950		
Rendement estimé		0,69	0,41	0,47	0,62	

D'après les caractéristiques de fonctionnement du système d'irrigation, il semble que la mesure de débit et de consommation conduise à une sous-estimation du débit réel. Pour faire cette remarque on se base sur les informations suivantes :

- les espacements pratiqués entre les passages d'enrouleur sont de 80 m,
- vu les caractéristiques de la buse utilisée (24mm), la portée permettant de réaliser des espacements de 80 m ne peut être obtenue qu'avec des débit d'environ 50m³/h.

On retient que :

- le compteur d'eau est certainement défaillant et une mesure de débit complémentaire est requise,
- le réseau de transport et distribution génère de forte pertes de charge, dont le coût en énergie et l'influence sur les performances de la pompe sont pénalisants pour l'efficacité énergétique du système. Une démarche de caractérisation plus détaillée du réseau est requise.

La préparation du dossier d'enquête

Pour chaque exploitation, un dossier spécifique est préparé sur la base des résultats de l'étude préparatoire. Ce dossier comprend une synthèse des résultats de l'étude préparatoire (structure de l'exploitation, principales cibles d'amélioration pressenties), les fiches d'enquêtes concernant les éléments techniques présents au sein de l'exploitation.

Itinéraire et rendez-vous

Dans le cadre d'un programme de diagnostic portant sur un grand nombre d'exploitations, il est particulièrement utile de chercher à optimiser les déplacements. Cette démarche permet en effet de réduire les coûts de réalisation et d'augmenter le temps disponible sur les exploitations. Dans l'objectif de réaliser des mesures en conditions réelles de fonctionnement des systèmes, on cherche à convenir avec l'exploitant d'un moment propice pour la réalisation de l'enquête et des mesures. Les rendez-vous sont pris par téléphone une ou deux semaines avant la date envisagée.

Réalisation de l'enquête

La réalisation de l'enquête doit se baser sur une relation de confiance avec l'exploitant agricole. S'il n'y a pas de recette particulière pour parvenir à une telle relation, on notera quand même qu'une capacité d'écoute constructive peut être un élément de réussite. Dans ce sens, l'enquêteur réserve du temps à l'exploitant pour bien exprimer ses problèmes, les solutions qu'il a envisagées et les freins qu'il rencontre pour la mise en œuvre de ses projets. Lorsque l'action des organismes qui portent le projet de réalisation des diagnostics est reconnue par les agriculteurs, on pourra rappeler le cadre dans lequel est réalisé le diagnostic.

La durée d'une enquête varie en fonction de la taille de l'exploitation et de la complexité des infrastructures à caractériser. Dans les cas des enquêtes expérimentales réalisées dans le Lot-et-Garonne et dans le Gharb la durée des enquêtes s'est échelonnée entre 1h30 et 3h. Dans un souci de respect de l'emploi du temps de l'exploitant, il est préférable de le prévenir le plus tôt possible de la durée estimée de l'enquête.

Lorsque l'exploitant ne dispose pas d'une information, il est souvent possible d'obtenir cette dernière indirectement par des calculs simples sur des informations disponibles. C'est notamment le cas pour les calculs de volume des apports pour lesquels, connaissant le débit, on cherche à évaluer la durée des apports. On rappelle, en outre, qu'il est souvent utile de revenir sur le schéma de l'exploitation.

8.3 Analyse des performances

8.3.1 Indicateurs généraux

Les indicateurs généraux des exploitations peuvent être évalués à partir des informations portant sur la structure et les résultats des exploitations. Dans le but d'évaluer un niveau de performance, on peut comparer les valeurs prises par ces indicateurs à des références locales, nationales ou internationales. La comparaison des indicateurs aux références locales permet de définir les performances et les marges de progrès qui peuvent être obtenues au sein d'une exploitation par rapport à un groupe d'exploitations évoluant dans les mêmes conditions.

Tableau 8-5 – Indicateurs concernant les apports en eau et les rendements pour six cultures fréquentes du Gharb. Les parcelles pour lesquelles des apports jugés trop élevés et/ou pour lesquelles les rendements sont faibles sont repérées comme des cibles pour la réalisation d'actions de maîtrise des apports en eau

Culture	EXPL. N°	Besoins estimés d'après les données climatiques moyennes (Rabat)	Résultats obtenus d'après l'enquête		
			Apports en eau pratiqués	Rendements réalisés	Prélèvements en eau par unité de production
			m ³ ha ⁻¹	t ha ⁻¹	m ³ kg ⁻¹
Bersim	6	2000	3024	100	0,3
Bersim	8	2000	3456	80	0,4
Betterave	? 7	1800	1512	70	0,2
Betterave	8	1000	2592	47	0,6
Betterave	9	1000	3456	50	0,7
Betterave	6	1500	1728	55	0,3
CaS*	6	6600	16470	82	2,0
CaS	7	6600	10800	81	1,3
CaS	8	8200	15811	100	1,6
CaS	9	8200	15811	100	1,6
Maïs	12	4400	5000	4	12,5
Maïs	3	4400	4536	4	11,3
Maïs	? 7	3500	2885	6,2	4,7
Melon	3	2600	5000	27	1,9
Melon	? 9	2600	1728	50	0,3
Melon	12	2600	2030	30	0,7
Melon	13	3000	7453	49	1,5
Tomate	6	4100	5000	65	0,8
Tomate	? 7	4100	3355	70	0,5
Tomate	12	4000	6720	40	1,7
Tomate	3	4000	4536	40	1,1
Tomate	5	4000	3419	40	0,9

*CaS : canne à sucre

■ Cibles privilégiées pour l'action

? Valeurs des rendements et des apports à confirmer

Ces références peuvent être évaluées à l'échelle territoriale dans le cadre d'un programme de diagnostic décrit au chapitre 7. Les références à l'échelle internationale (valeurs moyennes, valeurs moyennes dans les pays qui présentent les meilleurs résultats, etc.) permettent d'apprécier les marges de progrès. Cependant, de telles comparaisons doivent être manipulées avec précaution, du fait, d'une part, de la grande variété des contextes physiques (sol, climat) et, d'autre part, des différences significatives, qui existent d'un système de production à l'autre, en termes d'intrants.

Production

Le rendement des cultures [t ha⁻¹] :

Cet indicateur est très utilisé pour caractériser les performances agronomiques obtenues à l'échelle d'une parcelle, pour une culture donnée. Il permet de déterminer pour une zone, en fonction des intrants disponibles, les marges de manœuvre pour l'amélioration de la production. On peut également chercher à établir le gain de rendement obtenu grâce à la pratique de l'irrigation.

Production d'énergie alimentaire par hectare et par actif [GJ ha⁻¹] et [GJ / actif] :

Il s'agit de se faire une idée de l'intérêt du potentiel local de telle ou telle culture en matière d'approvisionnement alimentaire. A ce titre, la production d'énergie alimentaire par hectare et par actif agricole constitue un bon indicateur dans les contextes où la DEA est faible. Cet indicateur peut également être utilisé pour comparer les performances des exploitations pour la production des bioénergies (ADEME, 2002). Concernant la production d'énergie par actif agricole, elle permet d'estimer le nombre de personnes que peut nourrir un actif agricole – indépendamment des questions de composition de l'alimentation.

Consommation et prélèvement en eau

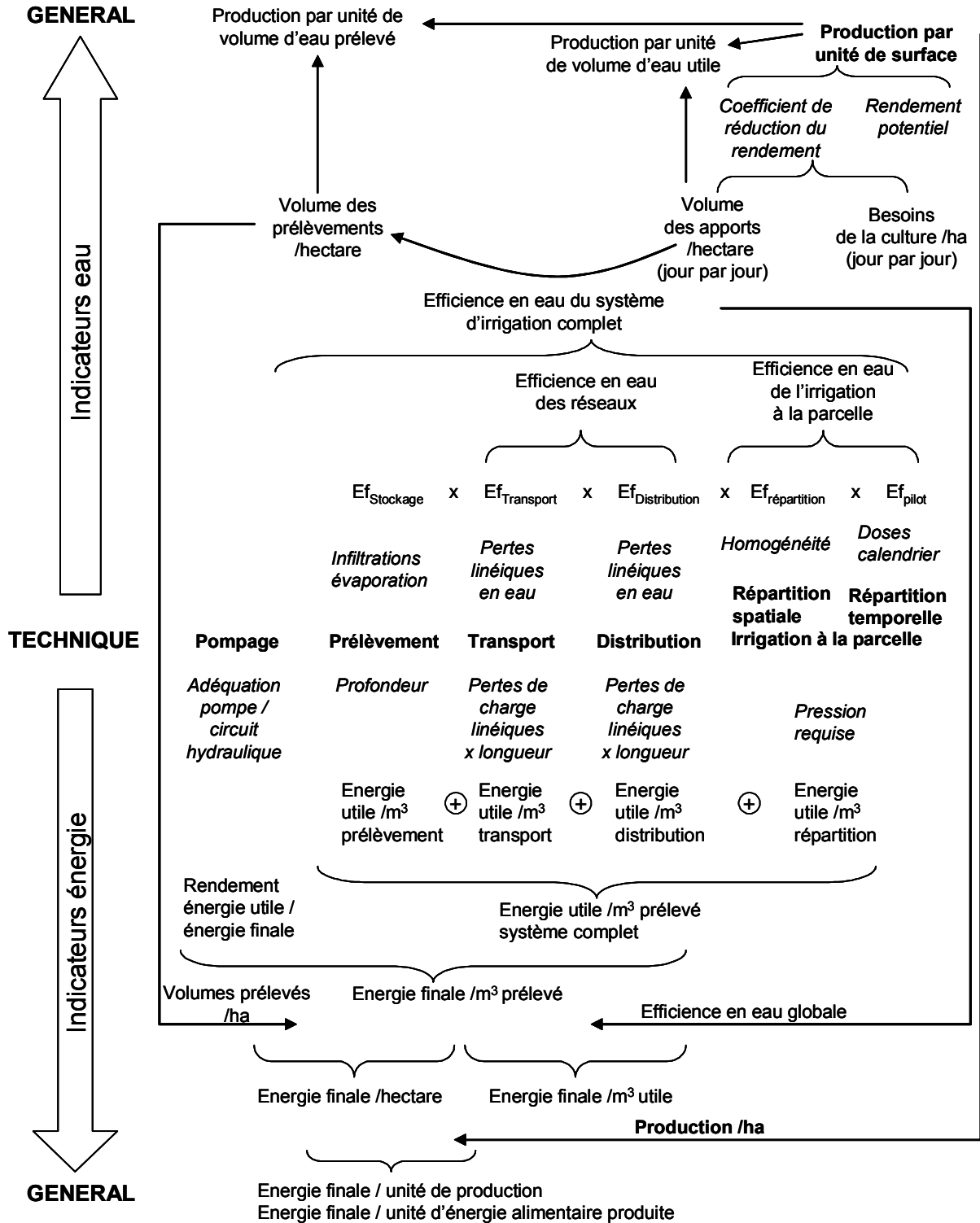
Volume d'eau consommé par unité de surface, par unité de production, et par unité d'énergie produite [m³ ha⁻¹], [m³ t⁻¹] et [m³ GJ⁻¹] (Tableau 8-5) :

Ces indicateurs permettent d'évaluer l'impact sur la ressource en eau des différentes cultures pratiquées sur une exploitation. Du point de vue de l'exploitation agricole, c'est souvent le volume d'eau consommé par unité de surface qui est utilisé comme critère de performance ainsi que pour le dimensionnement des installations. La consommation d'eau par unité de production et par unité d'énergie présente plus d'intérêt pour réaliser des choix de cultures, particulièrement dans les zones où les ressources en eau sont limitées.

Efficiences en eau, rapport entre volume consommé par les cultures et volume prélevé [SD] :

Comme nous l'avons vu au § 3.3, cet indicateur peut être évalué pour l'ensemble d'un système d'irrigation, ou pour chaque sous-fonction des infrastructures d'irrigation. Il donne une idée des marges de manœuvre de réduction des prélèvements en eau au niveau de la sous-fonction ou du système considéré. Comme nous l'avons vu au § 3.3.5, une faible efficacité en eau n'est pas toujours associée à un impact significatif sur la ressource en eau, par exemple lorsque l'eau perdue peut contribuer à recharger la nappe. En revanche une faible efficacité implique de prélever des volumes d'eau plus importants, ce qui se traduit par une augmentation de la demande en énergie.

Figure 8- 5 - Structure générale des indicateurs : à partir du centre de la figure (indicateurs techniques, sont définis les indicateurs généraux pour l'eau (partie supérieure) et pour l'énergie (partie inférieure))



Energie pour l'irrigation

Consommation d'énergie de l'irrigation par unité de surface, par unité de production, par unité d'énergie alimentaire produite [GJ ha^{-1}], [GJ t^{-1}], [GJ GJ^{-1}] :

Cet indicateur peut être évalué pour chaque parcelle ou pour chaque culture d'une exploitation. Au sein d'une exploitation il permet de repérer, par comparaison, les parcelles ou les systèmes sur lesquels des actions d'amélioration portant sur les infrastructures pourront être envisagées. La consommation par unité d'énergie produite apporte en outre des éléments de discussion quant à la pertinence des choix de culture et de système de production.

Part de l'irrigation dans la consommation énergétique de l'exploitation [SD] :

Ce ratio permet de valider la pertinence d'un diagnostic énergétique portant sur l'irrigation par rapport aux autres sous-fonctions de la production agricole.

Indicateurs économiques

Chiffre d'affaires par unité de surface et par actif agricole [monnaie locale ha^{-1}], [monnaie locale / actif agricole] :

Cet indicateur est utile pour le calcul des marges de bénéfice réalisées au sein de l'exploitation. Il permet également de se faire une idée de la faisabilité d'investissements.

Coûts de production par hectare [monnaie locale ha^{-1}] :

L'évaluation de cet indicateur nécessite un accès à la comptabilité de l'exploitant et peut se révéler relativement longue. Elle intègre en effet le coût de tous les facteurs de production pris dans un sens large c'est-à-dire intégrant les coûts en ressources humaines, les coûts du foncier et les taxes. La différence entre le chiffre d'affaires et ces « coûts de production » donne la marge de bénéfice, au niveau de l'exploitation et pour chaque culture pratiquée.

Répartition des coûts de l'irrigation [monnaie locale ha^{-1}] :

Dans les coûts de l'irrigation on peut distinguer le coût des infrastructures (investissements), les coûts de fonctionnement (eau, énergie notamment), et les coûts en ressources humaines. La connaissance de la répartition et de l'importance de ces coûts donne des éléments de décision économiques pour orienter les actions. En faisant le rapport entre la somme de ces coûts et les coûts de production, on évalue la part de l'irrigation dans les coûts de production. Enfin, la répartition des coûts de l'irrigation peut être évaluée à l'échelle de l'exploitation ou à l'échelle de chaque parcelle.

8.3.2 Indicateurs de performance technique « eau-énergie »

Ces indicateurs synthétiques de performance technique eau-énergie permettent d'identifier pratiquement et précisément, au sein des exploitations, l'origine éventuelle de consommations en eau et en énergie anormalement élevées.

Indicateurs de performance des infrastructures

Coût en énergie utile du **transport et de la distribution** [J m^{-4}] :

Il s'agit de déterminer les pertes de charge liées au transport et à la distribution dans les canalisations sous pression et d'en déduire l'énergie nécessaire pour faire parcourir un mètre de distance à un volume d'eau d'un m^3 . Dans le cas d'un réseau qui présente une baisse chronique de débit et de pression il peut être utile de comparer l'évaluation des pertes de charge des différentes portions d'un réseau avec des mesures de hauteur manométrique portant sur ces mêmes portions. Cette démarche peut être utilisée pour diagnostiquer, par exemple, un colmatage du réseau.

Tableau 8-6 – Facteurs d'hétérogénéité de la répartition de l'eau au niveau des parcelles

Origine de l'hétérogénéité	Moyen d'évaluation ou d'estimation
Irrigation gravitaire à la raie longue	
Variation des débits en début de raie	Observation et mesures de débits
Planage de mauvaise qualité	Observation pendant et après la phase d'irrigation des zones où l'eau ne parvient pas à s'infiltrer
Hétérogénéité dans la texture du sol	Observations
Irrigation par aspersion	
Variation des débits entre les asperseurs	Mesures de débits
Recouvrement excessif ou insuffisant des zones à portée des asperseurs	Etude des caractéristiques des asperseurs et de leur implantation
Irrigation localisée	
Variation des débits entre les distributeurs	Mesures de débits
Bouchage des distributeurs	Observation

Tableau 8-7 - Répartition des coûts de l'irrigation sur quatre exploitations du Gharb et comparaison avec le chiffre d'affaires réalisé

	Expl N°	Surface ha	Ressource	Technique	Répartition des coûts de l'irrigation				Total dh/ha	Chiffre d'affaire dh/ha	Part irrigation
					Eau	Energie	MO	Matériel			
Melon	3	8	Privée	Grav	0%	35%	61%	4%	1235	22500	6%
Tomate	3	10	Privée	Grav	0%	35%	61%	4%	1235	42250	3%
Maïs	3	2	Privée	Grav	0%	35%	61%	4%	1235		
Bananes	4	2	Privée	Loc	0%	13%	83%	4%	43875	840000	5%
Tomate	5	26	Privée	Loc-Gs	0%	33%	9%	58%	3935	45500	4%
Tomate	6	1	Privée	Grav	0%	38%	51%	11%	2947	80000	4%
Courgette	6	1	Privée	Grav	0%	38%	51%	11%	2947	33000	9%
CaS	6	1	Collectif	Grav	78%	0%	22%	0%	4247	16400	26%
Betterave	6	1	Privée	Asp	0%	20%	6%	74%	1254	24500	1%

Efficienc e en eau du transport [m³ m⁻³] :

Permet de caractériser la performance d'un réseau de transport pris dans son ensemble par le rapport du débit aval sur le débit amont.

Fuites et pertes en eau par unité de longueur du transport et de la distribution [m³ / m] :

Cet indicateur peut être estimé par des mesures de débits en amont et en aval des portions de réseau étudiées. L'évaluation de cet indicateur prend du sens dans le cas de canaux vétustes, de canaux en terre, ou pour la mise en évidence de fuites dans les réseaux sous pression.

Efficienc e en eau du système de répartition [SD] :

Dans le cas des systèmes de répartition de l'eau sur les parcelles, l'efficienc e en eau correspond à la part de l'apport en eau au niveau de la parcelle qui est utilisable par les cultures. En pratique cet indicateur est assez difficile à obtenir, son évaluation peut nécessiter des mesures impliquant beaucoup de matériel et de technicité. En toute rigueur l'évaluation de l'efficienc e en eau du système de répartition passe par l'évaluation de l'homogénéité de répartition de l'eau sur la parcelle.

Homogénéité de répartition de l'eau sur la parcelle [SD] :

Lorsque la répartition de l'eau n'est pas homogène sur la surface de la parcelle, l'apport peut être excédentaire pour certaines zones, ce qui se traduit par une perte d'eau par infiltration, et déficitaire pour d'autres zones de la parcelle, ce qui entraîne des pertes de rendement par stress hydrique.

Coût en énergie utile de la répartition de l'eau par m³ distribué et par m³ utile [J m⁻³] :

Cet indicateur, évalué à partir de la pression disponible pour la répartition de l'eau sur la parcelle, permet de comparer différentes techniques et de vérifier qu'une technique est mise en œuvre dans des conditions standard.

Rendement énergétique du pompage [SD] :

Il s'agit du rapport entre l'énergie utile produite et l'énergie finale consommée. Cet indicateur est très utile pour apprécier le dimensionnement d'une pompe. Il peut être évalué en se basant sur l'évaluation de l'énergie utile requise pour faire fonctionner le système d'irrigation et une mesure de la consommation d'énergie finale. Pour les pompes électriques, les factures d'électricité peuvent être utiles à une première estimation. Lorsque le rendement de pompage est faible, on cherche à déterminer si cela provient de l'usure de la pompe ou d'une mauvaise adéquation entre les caractéristiques de la pompe et celle du réseau hydraulique.

Mobilisation de ressources humaines pour l'irrigation [heure-homme ha⁻¹] :

Cet indicateur permet de rendre compte du besoin en ressource humaine pour l'installation des systèmes d'irrigation, la conduite des apports et pour le pompage dans le cas de certains pays en développement.

Indicateurs de performance du pilotage**Rapport dose pratiquée sur dose utile [SD] :**

Pour évaluer cet indicateur il faut connaître les caractéristiques hydriques du sol la profondeur d'enracinement par période et les doses des apports pratiqués par période. Si le rapport est supérieur à une certaine valeur par exemple 1,3, alors il convient de sensibiliser l'exploitant aux notions de base concernant les bilans hydriques.

Efficienc e du pilotage [SD] :

Il s'agit de déterminer à l'aide d'un bilan hydrique la part des apports en eau qui est utilisée par les cultures. Au niveau de la parcelle on distingue ainsi l'efficienc e liée à l'homogénéité de répartition spatiale de l'eau de l'efficienc e du pilotage dédié à la répartition des apports dans le temps. Cette distinction permet notamment de déterminer plus précisément les aspects sensibles de la gestion de l'eau au niveau de la parcelle.

Encadré 8-8 - Actions envisageables en irrigation à la raie courte (micro raie ou robta)

Cette pratique très courante s'adapte bien à une topographie accidentée et sa mise en œuvre est relativement simple. Cependant elle présente trois inconvénients majeurs. D'après Chabaca (2004), elle mobilise une main d'œuvre importante pour un travail pénible et continu (deux à trois personnes pendant 6 à 12 h pour un hectare), les pertes de surfaces occasionnées par l'aménagement des seguias et des diguettes sont importantes (12% de la surface sont rendus inutilisables par les seguias pour des raies de 6 à 10 m de long), les pertes en eau dans les seguias sont élevées (20 % du débit pour 50 m et 30 % du débit pour 100 m).

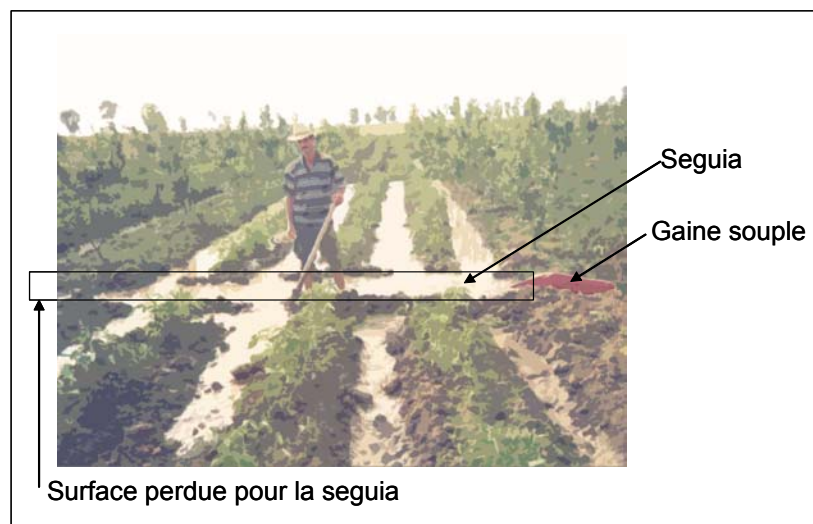
Deux interventions peuvent être envisagées pour réduire les inconvénients de cette technique :

- l'utilisation de gaines souples pour distribuer l'eau au niveau des blocs de raies en cours d'irrigation représente un investissement tout-à-fait accessible. Il permet de réduire les pertes en eau occasionnées par les seguias, et d'obtenir une meilleure homogénéité de répartition de l'eau sur la parcelle,
- l'allongement des raies dès que le terrain le permet. Dans de nombreuses exploitations où l'irrigation par raie courte est pratiquée, le matériel nécessaire pour réaliser le planage n'est pas accessible. Les méthodes plus modernes d'irrigation gravitaire (raies longues) ne sont, souvent, en effet, pas accessibles aux petites exploitations. En revanche, d'après Chabaca (2004), l'aménagement de raies de longueur intermédiaire (50 à 60 m) est à la portée des exploitants et permettrait une réduction significative des besoins en main d'œuvre et de la pénibilité du travail.

Les interventions proposées n'impliquent pas la mise en œuvre de matériel lourd de planage, ni d'investissement significatifs et leurs avantages sont immédiats. Concernant la réalisation de raies de taille intermédiaire, cette pratique peut être moins avantageuse dans le cas de sols très légers, sableux en particulier. Sa mise en œuvre pourrait être soutenue par des démarches de démonstration portées par les agriculteurs eux-mêmes et suivies dans un premier temps par des conseillers techniques.

L'utilisation de la gaine souple génère de faibles pertes de charge (de 2 m de colonne d'eau pour un débit de 10 l/s et une longueur de 200 m de gaine). Dans la mesure où cette charge n'est pas disponible dans les schémas de distribution collective par canaux, l'utilisation de gaine souple n'est pas adaptée à ces situations. En revanche, on peut envisager de remplacer la gaine souple par un revêtement des seguias avec une géo-membrane ou une bâche plastique de bonne qualité. La solution géo-membrane a été testée avec succès dans le Tadla au Maroc. Elle permet de réduire d'environ 15 % les pertes en eau dans les canaux quaternaires (dernier canal avant la parcelle) (Bellabes et al., 2004).

Figure 8- 6 – Configuration de l'irrigation par raie courte avec distribution de l'eau par gaine souple. Dans ce cas, la seguia de 1 m de large dessert deux raies de 20 m de long, la perte de surface occasionnée est réduite à moins de 3% de la surface utile



Coefficient de **réduction du rendement** [SD] :

Pour déterminer ce coefficient il faut disposer des bulletins météorologiques quotidiens sur la durée de la période de culture, du détail des apports pratiqués par l'exploitant et des données concernant les caractéristiques des sols. Il est alors possible par simulation d'évaluer ce coefficient et de le comparer avec sa valeur en agriculture pluviale. Ces résultats permettent de déduire, d'une part, le gain de production lié à l'irrigation et, d'autre part, le gain qui pourrait être réalisé en modifiant les règles appliquées pour le pilotage.

8.3.3 Analyse des performances énergétiques des systèmes d'irrigation

Il est utile pour les besoins du diagnostic de mettre au point un outil visant, d'après les données fournies par l'exploitant, à déterminer, pour chaque parcelle d'une exploitation, la répartition des consommations en eau, des besoins en énergie utile et des coûts en énergie finale. Un tel outil trouve notamment son utilité lorsqu'une partie du matériel est utilisée pour l'irrigation de plusieurs parcelles. Il permet de répartir les coûts de fonctionnement et les coûts d'investissement entre les cultures en fonction des surfaces cultivées ou des volumes d'eau mobilisés. Cet outil développé pour l'analyse des enquêtes réalisées en Lot-et-Garonne est décrit dans l'Encadré 7-3.

Par la suite dans le cadre d'un programme de diagnostic, on cherchera, à partir des indicateurs de performance et des ratios obtenus pour l'ensemble des exploitations, à déterminer des valeurs de référence spécifiques à la zone d'étude. On cherchera également, toujours en se basant sur l'ensemble des résultats pour la zone, à déterminer des valeurs seuils des indicateurs pour lesquelles on estime qu'une action peut conduire à une amélioration significative.

Enfin, les indicateurs propres à chaque parcelle et à chaque sous-fonction des exploitations sont comparés aux indicateurs de références et aux valeurs seuils déterminées pour la zone. De cette comparaison on extrait, pour chaque exploitation, les sous-fonctions et les parcelles pour lesquelles les performances sont faibles. Ces sous-fonctions et ces parcelles sont les cibles privilégiées sur lesquelles on appliquera, dans l'étape suivante du diagnostic, les simulations d'interventions.

8.4 Liste des actions à examiner

8.4.1 Actions sur les infrastructures

On présente ci-dessous un ensemble d'actions qui peuvent être mises en œuvre à l'échelle de l'exploitation pour améliorer les performances eau-énergie des systèmes. Le déclenchement de ces actions est recommandé, de façon très classique, lorsque les bénéfices qu'elles permettent sont supérieurs aux coûts de réalisation et plus précisément, lorsque le temps de retour sur investissement est jugé acceptable pour l'exploitation.

Les actions proposées sont classées par sous-fonctions de l'irrigation.

Sur les réseaux de transport et de distribution

Les principales actions qui peuvent être envisagées pour améliorer les performances eau-énergie des réseaux de transport et de distribution sont les suivantes :

- recherche et réparation des fuites,
- remplacement de portions de canalisations colmatées ou de section trop faible,
- amélioration du revêtement des canaux en terre.

Encadré 8-9 – Actions envisageables pour l'irrigation à la raie

Il convient de rappeler que l'irrigation à la raie est une **technique gravitaire de précision** et que sa mise en œuvre nécessite un **planage des parcelles de qualité** (planage au laser rotatif) et des techniques qui garantissent une **distribution homogène de l'eau en tête** des parcelles. En outre, cette technique demande une grande technicité qui repose sur la maîtrise de l'avancement et de l'infiltration de l'eau dans les raies en fonction notamment des caractéristiques du sol.

Mailhol (2001) souligne que l'humidité du sol a une forte influence sur l'infiltration et l'avancement de l'eau le long de la parcelle et qu'il convient par conséquent de considérer de façon intégrée le pilotage (prise de décision d'irriguer) et la conduite de l'irrigation (débit et durée des apports, possibilité d'utiliser un débit d'attaque et un débit d'entretien, conduite en raie bouchée ou avec colature).

En fonction de la disponibilité des ressources en eau, du climat et des contraintes économiques, l'exploitant recherche un compromis entre le rendement agricole des surfaces cultivées, celui de l'eau mobilisée (kg produit par m³ mobilisé) et la prise de risques propres aux différents choix techniques. Il est particulièrement délicat de proposer des recommandations systématiques pour les choix techniques en matière de conduite de l'irrigation à la raie. Cependant, des études basées sur des modèles physiques d'avancement de l'eau dans les raies permettent de décrire ces phénomènes de façon très satisfaisante et d'envisager la production de conseils techniques spécifiques à chaque exploitation. Mailhol (2005) propose quelques éléments de comparaison entre différents modèles (RAIEOPT, SIRMOD) de simulation d'avancement de l'eau en fonction des conditions locales.

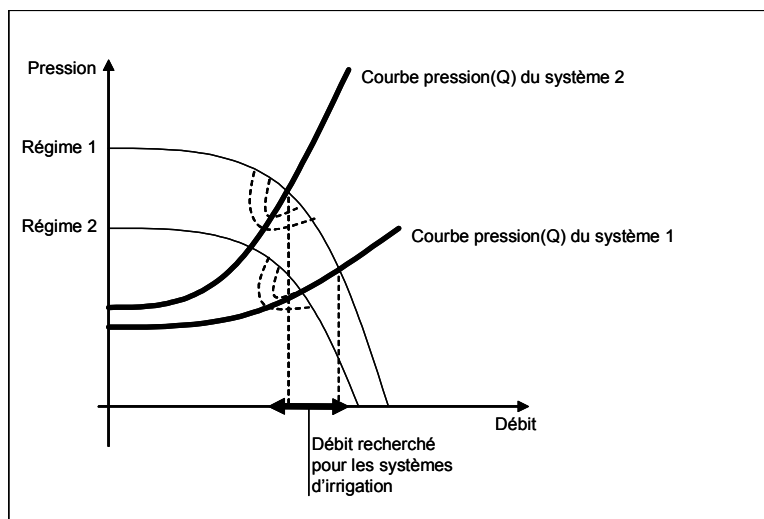
On identifie trois types d'interventions pour optimiser l'irrigation à la raie :

- la vérification et le maintien d'un planage de qualité, qui est à la base de la réussite,
- la recherche d'une bonne homogénéité entre les débits fournis à chaque raie, par un matériel adapté et bien réglé (rampe à vannettes, gaine souple à manchons, siphons),
- la mobilisation d'assistance technique pour déterminer les combinaisons de paramètres de conduite de l'irrigation à la raie les mieux adaptées.

Encadré 8-10 - La variation de vitesse en pompage

La variation de vitesse consiste à modifier la courbe débit-pression d'une pompe en modifiant la vitesse de rotation de cette dernière (Encadré 3-6). Cette modification de la vitesse est réalisée par un asservissement de la pompe par un système d'électronique de puissance. Cette amélioration technologique permet de conserver de bons rendements de pompage pour une large gamme de débits et de pressions.

Figure 8-7 - Utilisation d'une pompe dans deux gammes de débit-pression grâce à la variation de vitesse. La variation de vitesse permet de conserver de bons rendements énergétiques



Sur le stockage

L'ajout d'un réservoir d'eau (lac) sur une exploitation permet d'assouplir les contraintes qui portent sur le pilotage de l'irrigation. Dans un système de réseau collectif avec des tours d'eau de faible fréquence, l'utilisation d'un réservoir, sur le site de l'exploitation, permet également d'envisager d'utiliser des techniques localisées qui nécessitent des apports faibles mais fréquents. Suivant la nature du sol, un revêtement devra être disposé sur le fond du réservoir pour limiter les infiltrations. Dans le cas d'un sol argileux, le compactage de l'argile peut être suffisant.

Sur les systèmes d'irrigation à la parcelle

Deux types d'interventions peuvent être réalisés au niveau des systèmes de répartition de l'eau sur la parcelle irriguée. Ce sont :

- les adaptations et les modifications des caractéristiques des systèmes,
- la substitution d'un système par un autre.

Les actions spécifiques aux techniques d'irrigation à la raie, à la raie longue, par canon à enrouleur et par couverture intégrale sont détaillées dans l'Encadré 8-8, l'Encadré 8-9, l'Encadré 8-11 et l'Encadré 8-12.

Quelle que soit la technique utilisée, la mise en œuvre des systèmes d'irrigation implique la maîtrise des facteurs qui régissent la répartition de l'eau sur la surfaces des parcelles et les éventuelles pertes de distribution. Chaque technique de répartition de l'eau sur les parcelles possède ses paramètres d'optimisation, que l'on se propose de décrire ci-dessous.

Les actions de substitution d'un système par un autre, jugé plus performant ou mieux adapté à une nouvelle culture, peuvent être considérées du point de vue de la réduction des coûts en eau, en énergie et en main d'œuvre. Cependant pour envisager ces actions il convient de considérer le système d'irrigation dans son ensemble. En effet, suivant le type de conversion de technique d'irrigation à la parcelle il faudra tout d'abord s'assurer que la disponibilité de la ressource est adaptée.

Si tel n'est pas le cas, il peut être nécessaire de construire un réservoir. En outre des modifications plus ou moins profondes du réseau de transport et de distribution peuvent être nécessaires. Enfin, le changement de technique d'irrigation implique le plus souvent un nouveau savoir avec une technicité spécifique à acquérir. Dans de nombreux cas de reconversion de l'irrigation gravitaire en irrigation par aspersion, on constate que le bénéfice escompté en matière d'économie d'eau est difficile à obtenir en pratique. Le plus souvent cela peut s'expliquer par un manque de formation des irrigants, qui gardent les habitudes et les réflexes de conduite et de pilotage des apports de l'ancienne technique.

Sur les stations de pompage

Trois actions peuvent être envisagées sur les stations de pompage :

- le remplacement de la pompe lorsque le rendement énergétique est faible,
- le remplacement de la motorisation lorsqu'une énergie meilleur marché et/ou plus pratique d'utilisation est disponible (passage d'une motorisation diesel à une motorisation électrique),
- l'utilisation d'un variateur de vitesse pour optimiser le rendement de la pompe.

Encadré 8-11 - Irrigation par aspersion par canon entraîné par un enrouleur

Ce mode d'irrigation par aspersion est largement pratiqué en France pour son adaptabilité et les investissements relativement limités qu'il implique. C'est également le système de répartition de l'eau sur la parcelle dont le fonctionnement requiert la pression la plus élevée et de fait présente la consommation d'énergie la plus élevée par m³ distribué. La vitesse de rotation de l'enrouleur (réglable par un système mécanique ou électronique) est le paramètre utilisé pour régler la dose des apports. L'homogénéité de répartition de l'eau sur la parcelle en condition ventée est relativement sensible aux réglages portés au niveau du canon (choix de l'angle du canon, du diamètre de la buse, de l'angle du secteur arrosé) et à la période d'irrigation dans la journée. La méthode IRRIPARC développée par le Cemagref en partenariat avec Arvalis permet d'optimiser réglages et règles de conduite des apports en conditions ventées. Il existe en outre quelques améliorations techniques qui peuvent être apportées au niveau du canon. Ce sont notamment : la substitution du canon à retour rapide par un canon à retour lent et l'ajout d'un brise-jet qui permet de réduire les pertes en bouts de parcelle.

Les trois principales interventions qui peuvent être apportées sur les systèmes d'irrigation par aspersion avec canon entraîné par un enrouleur sont :

- la vérification périodique des performances du canon. L'usure de la buse de distribution peut générer des pertes de précision dans les apports. Cette intervention est souvent appuyée par les chambres d'agriculture,
- la recherche d'un optimum pour les réglages et la conduite des apports en mobilisant les outils adéquats (IRRIPARC),
- l'ajout d'un brise-jet et le remplacement du canon à retour rapide par un canon à retour lent.

Encadré 8-12 – Actions envisageables en irrigation par aspersion, couverture intégrale

Cette technique qui s'adapte bien aux différentes formes de parcelles et à des topographies assez variables permet une bonne efficacité de l'utilisation de l'eau. Cependant, une attention particulière doit être apportée à l'écartement entre les asperseurs dont dépend l'homogénéité de répartition de l'eau sur la parcelle. En outre ce système, une fois installé, demande peu de main d'œuvre pour le déclenchement des irrigations, qui peut parfaitement être automatisé. Dans le cas des couvertures antigel, le déclenchement de la mise en marche peut être asservi à la température.

Concernant l'espacement des asperseurs, la tendance actuelle est à la réduction des espacements. D'après Molle (2005), des écartements de 8 à 15 m deviennent plus fréquents au détriment des espacements de 18 à 24 m. Cette tendance peut s'accompagner d'une démarche visant à réduire la pression requise afin de minimiser le coût énergétique.

Les trois principales interventions sur les systèmes d'irrigation par aspersion par couverture intégrale :

- la réduction de l'espacement entre les asperseurs permet d'améliorer l'homogénéité de répartition de l'eau et de réduire la pression requise pour le système de répartition de l'eau sur la parcelle,
- l'automatisation en couverture intégrale consiste à asservir l'ouverture des vannes d'alimentation des sous-secteurs sur un programmeur. Cette intervention permet d'obtenir une bonne homogénéité dans la durée des apports entre secteurs et de diminuer le nombre d'interventions de l'exploitant,
- l'optimisation de la pluviométrie en fonction des caractéristiques du sol. Suivant les types de sol, la vitesse d'infiltration de l'eau est variable. Afin d'éviter le ruissellement de l'eau qui peut être provoqué par une pluviométrie trop forte il convient d'optimiser le choix des asperseurs. En outre, pour certains types de sol (sols battants), les vitesses d'infiltration peuvent diminuer au fil des irrigations. Cet inconvénient peut être corrigé par l'apport de matière organique dans le sol.

Le critère de décision pour déclencher le remplacement d'une pompe peut être le temps de retour sur investissement de l'opération. En première approximation, c'est le rapport de l'investissement par l'économie réalisée sur la facture énergétique (temps de retour brut).

Dans le cas d'une pompe électrique, il convient de tenir compte, dans l'économie réalisée, de la réduction de la puissance appelée et donc de la possibilité de diminuer le coût de l'abonnement pour l'achat d'électricité. On remarque en outre que les contrats d'achat d'électricité peuvent souvent être reconsidérés de façon avantageuse pour les exploitants.

Le remplacement du moteur et l'ajout d'un variateur de vitesse peuvent être déterminés en se basant sur le même type de critère. Concernant le variateur de vitesse, il s'agit de matériel d'électronique de puissance relativement coûteux qui ne présente d'intérêt que dans le cas d'une utilisation de la pompe pour des couples débit - pression différents (Encadré 8-10).

8.4.2 Actions sur le pilotage

Comme nous l'avons explicité au § 3.3.5, le pilotage de l'irrigation, qui concerne la répartition dans le temps des apports en eau, a une influence significative sur l'efficience en eau de l'irrigation. La réduction du volume des apports en eau consécutive à l'optimisation du pilotage se traduit, de fait, par une réduction de la demande en énergie et donc du coût de l'irrigation.

La première, et sûrement la plus pertinente, des actions qui peuvent être envisagées pour améliorer le pilotage de l'irrigation dans les contextes où les exploitants agricoles ont peu d'expérience de l'irrigation ou disposent d'une technicité plutôt réduite, est l'information sur les doses maximales d'irrigation qui sont utiles aux cultures. Cette action s'appuie sur la connaissance de la texture du sol et de la réserve utile. Elle consiste à communiquer à l'exploitant un repère pour décider que l'apport pratiqué est suffisant. Dans de nombreux cas, la valeur de la réserve utile n'a pas de sens pour l'exploitant. Il est davantage sensible à un schéma explicatif simple et à la traduction des explications en termes de durée optimale d'irrigation en fonction du débit du système utilisé ou de remplissage optimal des raies d'irrigation.

L'étape suivante de l'amélioration du pilotage est la formation des exploitants au bilan hydrique. De même que précédemment, cette formation, qui peut être plus ou moins approfondie suivant la précision recherchée et suivant la technicité des exploitants, doit être conçue dans le but d'être applicable par l'exploitant.

Enfin, quelle que soit la technique d'irrigation utilisée, les débits et le matériel disponibles pour pratiquer les apports en eau, sont limités. Le cas le plus contraignant est celui des périmètres collectifs d'irrigation avec tour d'eau. Un important travail de planification des apports doit être mis en œuvre par les exploitants pour s'adapter à cette contrainte.

On remarque, en outre, que lorsque les contraintes en termes de disponibilité du matériel ou de débits se renforcent, les marges de manœuvre pour optimiser le pilotage se réduisent et les besoins en termes de capacité de prévision des besoins en eau et de technicité augmentent. Nous pensons que toute action visant à diminuer les contraintes sur le pilotage pourrait avoir des effets positifs (Encadré 8-13).

Ces actions impliquent nécessairement de passer du temps pour réaliser les mesures, les formations et mettre en place l'organisation appropriée. L'évaluation de la pertinence de ce type d'action, d'une part, et sa mise en œuvre, d'autre part, trouvent toute leur place dans un programme tel que nous l'avons défini au chapitre précédent.

Tableau 8-8 - Liste sommaire des actions possibles au niveau des exploitations irriguées et nature des coûts, des bénéfiques et des conditions de réalisation de ces actions

Champs et nature des interventions	Nature des bénéfiques	Nature des coûts	Conditions de réalisation
Infrastructures			
Stockage			
Réalisation d'un réservoir	augmentation de la ressource en eau, amélioration des conditions de pilotage reduc. pertes en eau	financiers	disponibilité surface, et ressource d'alimentation pertes significatives
Agrandissement		financiers	
Modification du revêtement		financiers	
Systèmes			
substitution	Voir le détail		
Ajout d'accessoires			
Amélioration de la conduite			
Réseaux			
Optimisation sections / pertes de charge	reduc. demande énergie utile	financiers, (RH)	chgt système, maîtrise des coûts, vétusté
Extension	augment. surface irriguée	financiers, (RH)	
Pompage			
Redimensionnement / remplacement	reduc. conso. énergie finale	financier	chgt système, maîtrise des coûts, vétusté
Ajout d'un variateur de vitesse	reduc. conso. énergie finale	financier	
Energie			
Choix de l'énergie finale la plus adaptée	financier, RH financier, RH augment. Irrigation	RH, surfaces, financiers	disponibilité, maîtrise des coûts dispo. locale, technicité
Optimisation du contrat d'achat			
Mobilisation d'une ressource locale			
Pilotage			
Choix des doses d'irrigation	réduction des consommation d'eau, de l'infiltration des engrais, amélioration des rendements	RH, financiers (faibles)	technicité
Mesure RU et RFU pour chaque parcelle			
Evaluation des doses maximum utiles			
Prise en compte de l'avancement de la culture			
Mesure des volumes à l'aide d'un compteur			
Suivi d'une formation			
Déclanchement des apports			
Abonnement aux bulletins	optimisation de l'utilisation du matériel et de la ressource disponible		technicité
Mesure pluvio. évaluation ETC			
Mesure tensiométrique			
Suivi du bilan hydrique			
Prise en compte de l'avancement de la culture			
Suivi d'une formation			
Planification des apports			
Prévoir les besoins	optimisation de l'utilisation du matériel et de la ressource disponible		technicité
Planifier les demandes d'allocation			
Planifier l'utilisation du matériel			
Suivi d'une formation			
Choix des cultures des dates de plantation et des variétés			
Optimisation	production, conso. eau	financiers	technicité

Encadré 8-13 - Rechercher des propositions pratiques pour améliorer la gestion des tours d'eau

Dans les périmètres d'irrigation avec tour d'eau, comme c'est le cas dans les périmètres d'irrigation gravitaire dans le Gharb, on peut faire l'hypothèse que la responsabilisation des exploitants, leur donnant davantage de marges de manœuvre notamment dans la manipulation des infrastructures de distribution collective, permettrait d'optimiser les doses des apports.

On pourrait par exemple envisager un fonctionnement où les exploitants s'organisent en trinômes. L'exploitant B aide l'exploitant A à finir son tour d'eau, lorsque l'exploitant A a terminé son tour d'eau il va prévenir l'exploitant C pendant que l'exploitant B commence son tour d'eau. L'exploitant C rejoint l'exploitant B et l'aide à terminer son tour d'eau et ainsi de suite. Une telle organisation, ou toute autre proposition analogue acceptable pour les agriculteurs, permettrait tout à la fois de ne pas se retrouver dans des situations où le tour d'eau est trop long par rapport à la teneur en eau du sol et d'éviter les abus.

Nous pensons que la rigidité du mode de planification des apports en eau, et la rigidité de la définition des tours d'eau ont une influence significative et négative sur l'efficacité en eau des périmètres irrigués. Par conséquent, toute démarche qui tendrait à favoriser l'échange entre les agriculteurs et la définition de règles communes permettrait selon nous d'améliorer l'efficacité en eau des périmètres. Une telle démarche conduirait nécessairement à reconsidérer le rôle de l'aiguadier.

8.4.3 Actions sur les assolements

Les actions sur les assolements consistent à rechercher un arrangement optimal du choix des cultures et du calendrier de culture. Il s'agit notamment de garantir la disponibilité en eau pour les cultures compte tenu des caractéristiques des ressources en eau et du parc de matériel d'irrigation. Il s'agit également de chercher une configuration optimale qui permette d'assurer de bons résultats de production pour une prise de risque acceptable.

Une partie de la réflexion sur les choix d'assolement se fait à l'échelle nationale et se traduit par des règles visant soit à limiter soit à promouvoir le développement de telle ou telle culture. Ces règles se traduisent par des contraintes à l'échelle de l'exploitation qui doivent être prises en compte par l'exploitant dans ses choix d'assolement. Ce sont notamment, pour certaines cultures (tabac), des quotas de production par zone, ou encore des subventions.

8.4.4 Actions spécifiques engagées et envisagées par l'exploitant

Dans le cadre de leur stratégie de développement, certains agriculteurs élaborent des actions d'amélioration plus ou moins innovantes qui peuvent être complémentaires de la liste d'actions envisagées dans le cadre du diagnostic. L'évaluation des actions envisagées par l'exploitant suivant les critères du diagnostic eau-énergie, pourra lui apporter des éléments de décision complémentaires en vue d'une mise en œuvre effective. En outre certaines actions jugées pertinentes pourront être rajoutées à la liste à analyser pour les autres exploitations.

8.5 Conditions de réalisation et évaluation des actions

Cette dernière étape du diagnostic d'exploitation a pour but d'évaluer la faisabilité technique et l'intérêt de telle ou telle action. Après avoir identifié les conditions de réalisation des actions en termes de contraintes techniques, de compétences et de capacité d'investissement de l'exploitant, on se propose de décrire les principaux points à prendre en compte pour l'évaluation des coûts et les bénéfices propres aux actions considérées. On vérifiera enfin que les actions préconisées sont adaptées à la stratégie de l'exploitant.

8.5.1 Conditions pour la mise en œuvre des actions

La plupart des actions que l'on peut entreprendre pour modifier un système d'irrigation ou des règles de pilotage doivent satisfaire, pour leur mise en œuvre, des contraintes en termes de faisabilité technique, de technicité des opérateurs et de capacité d'investissement. Il en résulte que, pour chaque action envisagée, une démarche préalable de validation de la compatibilité portant sur les trois points mentionnés ci-dessus doit être menée. Les principaux points que nous avons identifiés pour garantir le succès des actions sont présentés dans ce paragraphe.

Techniques

Pour l'ensemble des actions portant sur les systèmes de répartition de l'eau sur les parcelles, que ces actions concernent la substitution d'un système par un autre ou la modification d'un système existant, il convient de vérifier les points suivants :

- adéquation entre la culture et la technique d'irrigation,
- adéquation entre le débit par unité de surface de la technique et la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol,

Tableau 8-9 – Compatibilité des différentes familles de systèmes de répartition de l'eau sur la parcelle avec les principales cultures

Cultures	Technique de répartition			Commentaires
	Gravitaire	Aspersion	Localisée	
Sucrière				
Betterave	P	A	I	Ces cultures n'apportent pas suffisamment de valeur ajoutée pour justifier des systèmes localisés. L'aspersion est mieux adaptée pour les betteraves qui sont sensibles à un sol trop humide (pourriture).
Canne à sucre	A	A	I	
Céréalière				
Blé	P	P	I	Pour le blé d'hiver, un à deux apports sont suffisants mais leur coût et la lourdeur de la mise en œuvre réduisent le recours à l'irrigation. Pour le riz les méthodes traditionnelles restent les plus adaptées.
Riz	A	P	I	
Maïs	P	A	P	
Maraîchère				
Tomate	P	I	A	Pour ces deux types de cultures à forte valeur ajoutée, l'irrigation localisée est particulièrement adaptée. Elle permet une gestion précise des apports en eau mais également en fertilisant. L'irrigation gravitaire accompagnée d'un pilotage efficace permet tout de même d'obtenir des rendements corrects. L'irrigation gravitaire reste une pratique très utilisée pour ces cultures.
Courgette	P	I	A	
Aubergine	P	I	A	
Poivron	P	I	A	
Arboriculture				
Agrumes	P	I	A	L'irrigation gravitaire et par aspersion peuvent être utilisées indifféremment pour cette culture à faible valeur ajoutée.
Pomme	P	I	A	
Banane	P	I	A	
Fourragère				
Bersim	A	A	I	
I	Inadapté			
P	Possible			
A	Adapté			

Tableau 8-10 - Compatibilité des différentes familles de systèmes de répartition de l'eau sur la parcelle avec différents modes d'accès aux ressources en eau

Ressources des exploitations	Technique de répartition			Commentaires
	Gravitaire	Aspersion	Localisée	
Réseau collectif				
Gravitaire	A	I	I	Les techniques sous pression ne sont pas compatibles avec les réseaux gravitaires. L'irrigation gravitaire à partir d'un réseau sous pression est dommageable à la qualité du service et implique des pertes d'énergie.
Sous pression	P	A	A	
Privée				
Surface	A	A	A	L'utilisation d'une ressource locale prélevée directement par l'exploitant permet l'utilisation de tous les types de système.
Souterraine	A	A	A	
I	Inadapté			
P	Possible			
A	Adapté			

- compatibilité entre les caractéristiques débit/pression du système modifié et celles du réseau de transport et de distribution. Il s'agit notamment de s'assurer que les pertes de charge pour le transport et la distribution sont acceptables compte tenu du débit du système après modification,
- compatibilité en termes de capacité et stabilité des performances de la station de pompage avec les nouvelles caractéristiques débits-pressions du système,
- disponibilité de la ressource en eau, de la station de pompage et du réseau de transport et de distribution pour assurer le fonctionnement du système modifié.

Dans le cas de nouvelles installations d'irrigation, on cherche naturellement à réaliser une configuration qui garantisse de bonnes performances. Il convient également de réaliser un choix concernant l'énergie finale utilisée. Ce choix se fait suivant deux critères : le coût de l'approvisionnement en énergie, et la qualité du service d'approvisionnement en énergie (sécurité d'approvisionnement pendant la période d'irrigation, facilité d'accès).

Lorsque l'on envisage d'affiner le pilotage de l'irrigation, il faut s'assurer que les moyens de mesure disponibles permettent d'obtenir les résultats recherchés. Les principaux instruments nécessaires au pilotage de l'irrigation sont les suivants :

- un compteur d'eau,
- un pluviomètre,
- un moyen d'évaluer l'évapotranspiration (accès au bulletin détaillé d'une station météorologique proche, bac d'évaporation),
- éventuellement un tensiomètre.

Il convient également de connaître précisément la texture du sol et sa réserve utile.

En complément aux remarques générales évoquées ci-dessus, on note que de nombreuses évolutions techniques impliquent des contraintes particulières dont quelques exemples sont donnés ci-dessous :

- la technique d'irrigation par canon à enrouleur mobilise un tracteur pendant trois quarts d'heure pour chaque passage,
- pour tous les automates de programmation il faut prévoir une alimentation électrique (secteur, batterie, ou panneau photovoltaïque),
- les techniques d'irrigation localisées impliquent l'installation de filtres dont la technologie doit être adaptée à la qualité de l'eau, d'une part, et à la tolérance des distributeurs, d'autre part,
- l'irrigation gravitaire par raie longue nécessite de mobiliser chaque année du matériel de planage de précision,
- lors du remplacement d'une pompe, il convient de s'assurer que la vitesse de rotation de la nouvelle pompe est compatible avec celle du moteur.

Enfin, pour toute action impliquant l'achat de matériel, on vérifiera que ce matériel et les pièces de rechange, nécessaires à son entretien et sa maintenance, sont bien disponibles en se référant à l'étude préparatoire de la zone.

Technicité et savoir faire

Par ailleurs, des règles de l'art spécifiques à chaque technique doivent être respectées pour obtenir les performances optimales des systèmes utilisés. Ces règles concernent la conduite et le pilotage de l'irrigation, la gestion et l'entretien du matériel.

Encadré 8-14 - Production sucrière dans le Gharb (3/4) : comparaison des indicateurs de quatre options de la production sucrière (betterave et canne à sucre – aspersion et gravitaire)

On se propose de comparer le bilan eau-énergie de l'irrigation des deux cultures sucrières du Gharb pour les deux types d'irrigation utilisés. La grande majorité de la culture sucrière réalisée dans le Gharb est irriguée à partir de réseaux collectifs alimentés en énergie par le réseau électrique national. La demande en énergie est ramenée à une demande en énergie primaire en tenant compte des modalités de production de l'électricité au Maroc et du rendement des différents types de centrales de production d'électricité (94 % de la production réalisée par des centrales thermiques classiques, 2,84 kWh d'énergie thermique par kWh d'énergie électrique produit et distribué).

Figure 8- 8 - Bilan eau-énergie de la production de sucre en fonction de la culture et du type de système d'irrigation utilisé

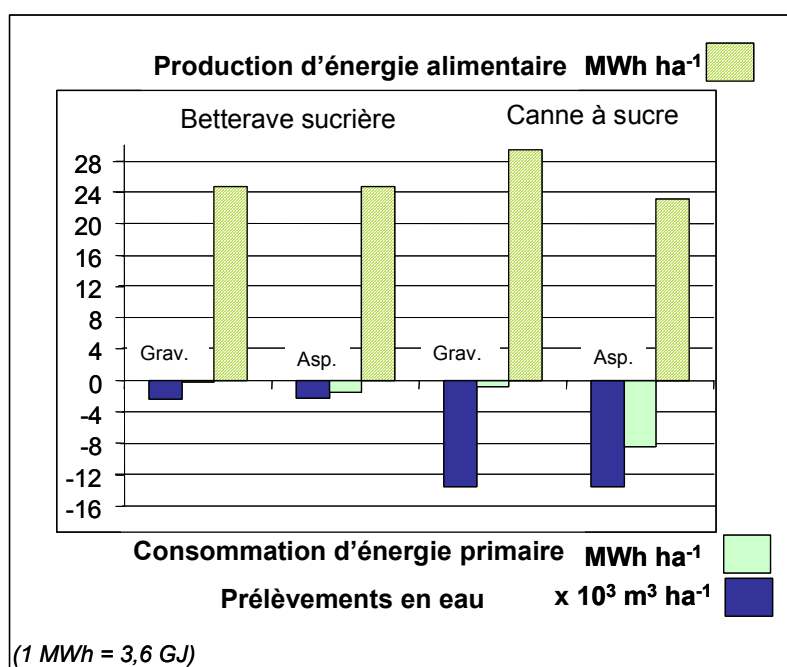


Tableau 8-11 – Bilan économique des quatre options

Cultures	Techniques d'irrigation	Canne à sucre		Betterave	
		Gravitaire	Aspersion	Gravitaire	Aspersion
Eau					
Besoin en eau (d'après données climatiques)	m³/ha	7000	7000	1500	1500
Demande en eau (calcul)	m³/ha	14000	12000	3000	2500
Prélèvements effectifs (enquête)	m³/ha	13500	15000	2600	2500
Tarifs de l'eau d'irrigation		0,28	0,48	0,28	0,48
Coûts de production					
Irrigation	dh/ha	3780	7200	728	1200
Autres coûts	dh/ha		6800		7500
Production					
Rendement	t/ha	92	92	68	68
Prix de vente	dh/t	250	250	290	290
Produit brut	dh/ha	23000	23000	19720	19720
Marge brute	dh/ha	12420	9000	11492	11020

1 dh (dirham) = 0,091 €

L'écart entre la marge brute des différentes options de production est relativement faible, seule la marge brute de la canne à sucre irriguée par aspersion est plus faible d'environ 20 à 25% par rapport aux autres options. Par ailleurs, l'option présente des indicateurs de consommation d'eau et d'énergie particulièrement médiocres.

On remarque qu'une attention particulière devra être portée à la formation des exploitants qui changent de familles de systèmes d'irrigation (passage de l'irrigation gravitaire à l'irrigation par aspersion ou à l'irrigation localisée). En effet, pour chacune de ces techniques, les règles de conduite des apports sont très différentes. On note, par exemple, que l'irrigation gravitaire et l'irrigation par aspersion consistent en des apports conséquents espacés de plusieurs jours, alors qu'en irrigation localisée, les apports consistent en de faibles doses quotidiennes.

Par ailleurs, du point de vue agronomique, il importe que lors de la mise en œuvre d'une nouvelle culture l'exploitant ait accès à l'ensemble des informations nécessaires pour garantir des apports en eau optimaux notamment en fonction des périodes de développement de la culture.

Trésorerie, capacité de paiement, capacité d'investissement

Pour conseiller la réalisation de telle ou telle action, il convient enfin de s'assurer que l'agriculteur dispose des moyens de faire face aux besoins de trésorerie qu'implique la réalisation de cette action. On distingue deux types de contraintes financières :

- les surcoûts dus aux investissements qui doivent souvent être amortis sur plusieurs années, achats de matériel, nouveaux aménagements,
- les surcoûts de fonctionnement qui se produisent lorsque le niveau d'intrants augmente.

Les surcoûts de fonctionnement peuvent notamment se produire dans le cas du passage d'un pompage manuel ou par manège animal à un pompage motorisé. Dans le cadre de la petite agriculture dans les pays les plus pauvres, le coût de l'énergie peut être très pénalisant pour le développement de l'irrigation.

Ces surcoûts doivent être pris en compte et il convient de vérifier que l'agriculteur a bien accès à la ressource financière nécessaire à la réalisation des actions préconisées. En se basant sur les résultats de l'étude préparatoire du diagnostic, on vérifiera notamment qu'il existe un accès au crédit pour le type d'investissement envisagé. En outre, le coût du crédit devra être pris en compte dans l'analyse coût-bénéfice de l'action considérée.

Par ailleurs, il convient de noter que, dans le cadre d'un programme de diagnostic, des solutions de financement, et la possibilité de mettre en œuvre des aides, pourront être envisagées et évaluées par le groupe de suivi du programme (chapitre 7).

8.5.2 Coûts et bénéfices associés aux actions

Il s'agit de déterminer les éléments à prendre en compte pour évaluer le coût et les bénéfices associés à la réalisation des différentes actions et de leurs conditions de mise en œuvre. Nous proposons de porter notre attention sur les quatre types de coûts et de bénéfices détaillés ci-dessous et qui doivent, selon nous, être pris en compte pour évaluer une action au sein d'une exploitation irriguée :

- production,
- demande en eau et en énergie,
- besoins en ressources humaines,
- coûts économiques.

Pour réaliser l'évaluation des coûts et des bénéfices qui peuvent résulter d'une action, on propose de considérer les indicateurs de performance de l'exploitation dans son état initial et d'estimer l'influence des différentes actions sur ces indicateurs.

Tableau 8-12 – Exemple d'évaluation de l'impact en termes d'économie d'énergie et de réduction des coûts d'une action, le remplacement d'une pompe. On rappelle que pour un tiers des pompes sur lesquelles a porté l'enquête en Lot-et-Garonne (28 pompes), le rendement énergétique estimé était inférieur à 40%

	Unités	Avant	Après
Données générales			
Culture		Maïs	Maïs
Technique de répartition de l'eau		Canon - enrouleur	Canon - enrouleur
Surface	ha	15	15
Prélèvement en eau			
Besoin en eau	m3 / saison	2500	2500
Apport d'une dose d'irrigation	mm	25	25
Nombre de doses	doses / saison	8	8
Efficienc e en eau du système complet	[SD]	70%	70%
Volum e pompé par dose	m3 / dose	5357	5357
Volum e pompé par ha et par saison	m3 / ha / saison	2857	2857
Amortissement du matériel			
Système	€	13000	13000
Réseau (300 m)	€	900	900
Durée d'amortissement	ans	20	20
Pompe	€	3000	6000
Durée d'amortissement	ans	10	10
Total amortissement	€/an	995	1295
Energie			
HMT	mce	130	90
Energie utile	kWh / dose	1880	1302
Rendement énergétique du pompage	[SD]	48%	65%
Energie finale	kWh / dose	3917	2003
Puissance finale requise	kW	36,6	18,7
Puissance souscrite	KVA	37	19
Coût de l'abonnement (Tarif jaune - EDF)	€ / kVA / saison	20,59	20,59
Prix abonnement	€/an	952	489
Tarif de l'électricité	€/kWh	0,033	0,033
Coût de l'électricité (1 saison)	€ / saison	1035	529
Coût de l'électricité (conso. + abo..)	€ / saison	1987	1018
Consommation gasoil (tracteur)	l/ha/dose	1,5	1,5
Consommation gasoil (tracteur)	l / saison	180	180
Tarif du gasoil agricole (2005)	€/l	0,6734	0,6734
Coût du gasoil	€ / saison	121	121
Coût total (hors main d'œuvre)	€ / an	3103	2434
Coût total par hectare (hors MO)	€ / ha / an	207	162
dont amortissement	€ / ha / an	66	86
électricité	€ / ha / an	132	68
Investissement	€		3000
Economie annuelle	€ / an		969
Temps de retour brut	années		< 4
Economie réalisée sur 10 ans	€		5000

■ Action (changement de pompe)
 ■ Paramètres influencés par l'action

Production

En matière de production, c'est l'amélioration, le maintien ou la diminution de la part utile de la production qu'il convient de considérer. Pour ce faire, on considère dans un premier temps le coefficient de réduction de rendement associé au pilotage de l'irrigation et dans un second temps les coefficients d'homogénéité de répartition spatiale avant et après la mise en œuvre de l'action. Pour le pilotage, le gain de production éventuel peut être évalué par simulation. En revanche, l'évaluation de l'influence de l'homogénéité de répartition spatiale sur les rendements est plus délicate à apprécier. En effet, l'homogénéité de répartition, couplée à l'efficacité en eau et au rendement, est difficile à évaluer dans le cadre d'un diagnostic. A défaut d'une estimation quantitative de l'amélioration de l'homogénéité et de son influence sur le rendement, on cherchera à estimer de façon qualitative le gain escompté.

Demande en eau et en énergie

Pour évaluer l'influence des actions sur la demande en eau et en énergie, on applique les nouvelles caractéristiques des systèmes et on en déduit l'influence en termes d'efficacité du système complet et de demande en énergie utile et finale. Les coûts associés aux consommations d'eau et d'énergie sont ensuite évalués pour la configuration initiale et les différentes configurations résultantes des actions envisagées. Pour réaliser cette estimation on prend en compte la variation des consommations d'une situation à l'autre et les tarifs appliqués à l'eau et à l'énergie pour le cas spécifique de l'exploitation. Dans le cas d'une alimentation électrique, on prend en compte la réévaluation du prix de l'abonnement.

Pour les besoins du programme de diagnostic, les résultats attendus en termes d'économie d'eau et d'énergie sont exprimés par unité de surface, de production et par exploitation. Lorsque ces résultats sont jugés significatifs des moyens économiques, et humains pourront être engagés, à l'échelle de la zone, pour favoriser les actions relatives dans le cadre de politiques d'économie.

Besoin en ressources humaines

Plusieurs actions présentent une influence directe sur la durée des opérations d'installation des systèmes d'irrigation et de conduite des apports en eau. Le passage des techniques d'irrigation traditionnelles aux techniques d'irrigation plus récentes s'accompagne d'une réduction significative du besoin en ressources humaines pour des tâches souvent pénibles. Dans les contextes où le prix de la main d'œuvre augmente, cet aspect doit être pris en compte avec beaucoup d'attention car il constitue l'une des principales raisons de la substitution d'un système par un autre. De même que pour l'énergie et la production, le besoin en ressource humaine est traduit en termes économiques. Cependant, on prendra soin de distinguer les ressources humaines mobilisées disponibles dans la famille de l'exploitant des ressources humaines extérieures.

En outre, indépendamment du coût économique de la mobilisation des ressources humaines, on remarque que toutes les opérations d'aménagement du sol pour l'irrigation réalisées par des travaux manuels constituent des travaux pénibles et longs. Il en résulte que les recommandations qui impliquent une augmentation de ce type de travail (aménagement des bouts de raie, amélioration du planage, aménagement des seguias) ne sont souvent pas considérées sérieusement par les exploitants tant qu'il ne disposent pas du matériel agricole nécessaire pour réaliser ces opérations.

Encadré 8-15 – Production sucrière dans le Gharb (4/4) : évaluation des solutions de reconversion des systèmes et des cultures pour le remplacement de la canne à sucre irriguée dans les périmètres collectifs

Nous avons vu que, dans le Gharb, l'utilisation des terres aménagées pour l'irrigation par aspersion pour la production de canne à sucre conduit à une consommation d'eau élevée et à des résultats économiques médiocres. On propose de considérer la possibilité de valoriser les installations collectives pour l'irrigation d'autres cultures plus avantageuses.

Les contraintes des réseaux sous-pression à prendre en compte sont, comme nous l'avons vu : un coût de l'eau élevé et un débit disponible limité à 4,5 m³/h pour des parcelles de 1,46 ha. En contrepartie, les réseaux sous pression sont conçus pour permettre aux exploitants d'accéder à l'eau à chaque fois qu'ils souhaitent irriguer sans la contrainte des tours d'eau.

Compte tenu de ces remarques on propose d'utiliser les systèmes sous pression pour faire fonctionner des systèmes d'irrigation localisée dans le but d'irriguer des cultures à fortes valeurs ajoutées.

Intérêt économique

Ces cultures principalement maraîchères (melons, pastèques, tomates, poivrons) irriguées en localisé permettent de réaliser des produits bruts 30000 à 40000 dh/ha. Compte tenu des coûts de production (hors irrigation) de 7000 dh/ha et du coût de l'eau environ 3000 dh/ha (pour 6000 m³/ha/saison) et des investissements à réaliser pour l'installation de systèmes d'irrigation localisée (7000 dh/ha), cette configuration permettrait de réaliser des marges brutes de 13000 à 23000 dh/ha. Pour une consommation d'eau divisée par deux, les exploitants auraient accès à la possibilité d'améliorer leur revenu de façon significative.

Faisabilité technique

La pression disponible au niveau des exploitations est d'environ 30 m de colonne d'eau. Cette pression est suffisante pour réaliser la filtration et la distribution de l'eau en irrigation localisée.

Le débit disponible de 4,5 m³/h représente un volume de 108 m³/j soit 73 m³ j⁻¹ ha⁻¹. Si on considère que les systèmes d'irrigation localisée peuvent être utilisés avec une efficacité de 85%, le volume quotidien disponible permettrait de satisfaire les cultures avec une demande en période de pointe de 6,3 mm j⁻¹. Cette disponibilité ne permet pas de couvrir la totalité des besoins qui s'élève à 8,4 mm en période de pointe (ET0 en juin 7 mm avec kc = 1,2). On propose, en conséquence, de réduire la surface équipée à 1 ha par parcelle au lieu de 1,46 ha.

Technicité requise

Cette reconversion ne sera pleinement efficace que si les exploitants agricoles sont formés dans un même temps à la pratique de l'irrigation localisée et accompagnés pendant les deux ou trois premières années par des techniciens agricoles. Dans un second temps, les exploitants pourront être formés à la fertigation.

Coûts et bénéfices économiques

On réalise un bilan économique comparatif de la mise en œuvre des actions. Ce bilan, réalisé pour les actions jugées pertinentes prises individuellement et en combinaisons, intègre la synthèse des coûts relatifs à chacun des aspects mentionnés ci-dessus. Lorsque les actions se traduisent par des gains de production, ces gains traduits en termes économiques sont intégrés dans le bilan économique des actions. Parallèlement, les investissements nécessaires à la réalisation des actions et de leurs conditions de mise en œuvre sont évalués en prenant en compte le coût des emprunts et les aides disponibles.

On en déduit les temps de retour sur investissement des différentes actions considérées individuellement ou en combinaisons et on classe les actions en fonction de leur portée et de leur faisabilité économique. Un exemple, d'évaluation d'action de réduction des coûts, portant sur le remplacement d'une pompe de faible rendement par une pompe de meilleur rendement, est proposé dans le Tableau 8-12.

8.5.3 Adéquation avec les directions stratégiques privilégiées par l'exploitant

Le dernier point à prendre en compte dans l'évaluation des actions est l'adéquation des actions proposées avec la stratégie de l'exploitant agricole. Les bénéfices des actions considérées comme avantageuses sont examinés du point de vue des priorités stratégiques de l'exploitant. En outre, une attention particulière est apportée aux actions engagées et envisagées par l'exploitant.

CONCLUSION GENERALE

Il est bien clair que le problème de l'alimentation mondiale principalement assurée par la production agricole est un élément clé dans toute politique de développement qui se voudrait tout à la fois équitable, durable et économiquement viable.

D'une manière plus précise, on peut utiliser trois clés de lecture pour aborder les problématiques liées à un développement harmonieux et raisonné de l'agriculture. Ces trois clés sont l'alimentation elle-même, les ressources en eau mobilisées ou mobilisables pour la production agricole et, enfin, assez souvent, les énergies à mobiliser pour l'irrigation.

Comme tout problème où les modes d'interventions humains sont souvent variés et mobilisent des compétences et des spécialités extrêmement diverses, le vaste champ abordé dans ce travail l'a déjà été au travers de travaux très nombreux.

Comme nous l'avons indiqué dans l'introduction, l'objectif de notre démarche était de travailler à **l'amélioration des conditions de préparation à l'action**, un domaine dans lequel il y a toujours beaucoup à faire. Il nous a semblé que, tant dans la manière de progresser que dans celle de transmettre une expérience, notre démarche devait s'appuyer sur deux étapes :

- une présentation générale pour le lecteur, nous rassurant sur notre bonne compréhension de base des problèmes rencontrés dans ce vaste domaine,
- un travail, nécessairement mené à partir de travaux de terrain et d'études de cas réels, conduisant à **la formulation d'un certain nombre de règles à respecter avant toute décision**, lorsqu'on aborde une situation nouvelle dans un contexte nouveau.

Sur le premier volet, consacré à la démarche générale et à la problématique, nous avons fait le choix de poser **les besoins alimentaires des hommes comme une contrainte de base** dont la satisfaction est présentée comme l'objectif principal de l'ensemble du secteur agro-alimentaire. Après avoir explicité les implications de cette contrainte, en termes de besoins de production quantitatifs (traduction énergétique des besoins d'une population), nous avons cherché à identifier les contraintes associées à la production agricole en détaillant les contraintes propres à l'irrigation tant en termes de besoins en eau qu'en termes de ressources mobilisables.

A l'issue de cette approche sur les contraintes, nous avons pu constater que si la demande alimentaire est relativement homogène entre les populations, les ressources naturelles nécessaires à la production à la production agricole sont distribuées de façon relativement hétérogène. En dehors de cette remarque, qui constitue une première invitation à considérer la **diversité des contextes** avec attention, cette étude des contraintes ne permet pas d'avancer sur le plan opérationnel.

L'étude des fonctions de l'approvisionnement alimentaire et de l'irrigation nous a permis d'identifier quelques-unes des principales pistes d'amélioration de l'efficacité des systèmes. Elles concernent tout d'abord la répartition qualitative d'une part et quantitative d'autre part du flux de production alimentaire disponible. Nous avons notamment souligné, à cette occasion, l'inutilité physiologique et l'inefficacité énergétique d'alimentations excessivement carnées.

Lot-et-Garonne en France

Observations

A l'échelle nationale, les objectifs prioritaires sont la durabilité physique de la mobilisation des ressources et la rentabilité économique de l'agriculture. Il n'y a pas de problème d'approvisionnement alimentaire en France. L'agriculture intensive se justifie par des considérations économiques. Cependant, les marges de bénéfices relativement faibles réalisées notamment sur les grandes cultures et l'élevage témoignent d'un secteur très sensible où **le coût des intrants et particulièrement de l'énergie a une influence significative sur la viabilité économique** de l'activité. Tout accroissement de ces coûts renforce encore cette influence.

A l'échelle territoriale, les **organisations d'agriculteurs sont nombreuses et efficaces**. Elles permettent une amélioration continue des performances en termes de productivité et de gestion des ressources en eau.

A l'échelle des exploitations, la priorité est à la **maîtrise des coûts de production**. L'énergie représente une part significative du coût de l'irrigation et des points d'amélioration pertinents existent.

Recommandations

A l'échelle nationale, une attention particulière doit être portée à **l'évolution des tarifs de l'énergie** et notamment de l'électricité pour l'agriculture et l'irrigation.

A l'échelle territoriale, un **accompagnement spécifique portant sur l'amélioration des performances énergétiques** peut être envisagé dans le cadre d'un programme de diagnostic. Un tel programme pourra s'appuyer sur les organisations et les réseaux d'appui techniques existant. Les grandes cultures irriguées constituent une cible privilégiée pour ce type de programme.

A l'échelle des exploitations, les actions recommandées portent principalement sur la réduction de la facture énergétique de l'irrigation. **Le remplacement, lorsque c'est possible, des enrouleurs par des couvertures intégrales ou des pivots, l'optimisation des pompes et l'optimisation des abonnements d'achat d'électricité** constituent les trois principaux points d'amélioration au niveau des exploitations irriguées. Enfin, la réflexion sur le choix des assolements, engagée par les organismes de conseil aux exploitants, doit être poursuivie.

Des potentialités significatives d'amélioration de l'efficacité énergétique dans la répartition spatiale de la production, notamment dans les échanges internationaux, ont été soulignées. Concernant l'irrigation, la décomposition de la pratique en sous-fonctions, permet de définir l'ensemble des déterminants de la demande en eau et en énergie des différentes pratiques tout en soulignant les points sensibles pour l'optimisation énergétique que sont :

- la **réduction de la hauteur manométrique** requise pour les systèmes,
- une démarche systématique de (re)**dimensionnement des pompes** d'irrigation,
- la diffusion de **conseils techniques portant sur le pilotage** de l'irrigation,
- le rôle significatif des règles de distribution de l'eau sur la qualité de l'irrigation,
- la limitation, en cas de ressources en eau peu disponibles, de la pratique de l'agriculture irriguée sur des sols légers impliquant des apports en eau fréquents et une consommation nette en eau élevée.

Il nous a ensuite semblé indispensable de chercher à **définir les implications pratiques des objectifs** d'efficacité d'approvisionnement et de production alimentaire, de durabilité et de productivité. En effet, la connaissance des contraintes, des potentialités de production et d'amélioration des performances des systèmes ne permet pas d'orienter une démarche de développement et il convient pour ce faire de quantifier les efforts à fournir pour parvenir à un état convenable de la situation. Cette démarche nous a essentiellement permis traduire l'objectif de réduction du nombre de sous-nourris en termes de disponibilité énergétique alimentaire et de production agricole à atteindre. Nous retenons également que cette description des objectifs de production doit permettre de définir **pour chaque contexte un niveau requis de l'intensification de la production agricole** en vue de combler les déficits d'approvisionnement alimentaire nationaux.

On rappelle ci-dessous les principaux objectifs identifiés :

- améliorer l'efficacité de l'approvisionnement alimentaire par une diminution de la part des sous-nourris dans une population,
- augmenter la DEA, d'une part, et améliorer la répartition, d'autre part, pour satisfaire l'objectif en terme d'efficacité de l'approvisionnement,
- atteindre à l'échelle des nations, le niveau d'intensification de la production agricole requis pour combler le déficit d'approvisionnement alimentaire,
- atteindre un niveau de mobilisation des ressources en eau, en sol et à terme en énergie qui soit physiquement durable,
- optimiser le rapport entre les coûts et les bénéfices de la production et de l'irrigation dans le respect des autres objectifs.

Ces objectifs sont liés entre eux par des relations de dépendance allant du plus général au plus opérationnel.

Nous tenons à souligner que certains choix de production ou d'approvisionnement sont établis principalement sur la base de critères économiques dont la rationalité en matière d'équité d'approvisionnement et de gestion durable des ressources naturelles semble tout-à-fait contestable. Il semble, en effet, que, pour les différents pays, la réalisation d'objectifs d'intensification minimum de la production agricole, requise pour combler les déficits d'approvisionnement, nécessite des quantités d'énergie minimales que les contraintes économiques ne permettent pas de satisfaire. Nous pensons que des **dotations minimales en énergie pour l'agriculture**, déterminées en cohérence avec chaque contexte, devront nécessairement accompagner les projets de développement agricole. Ces dotations devront s'inscrire dans le cadre d'une **politique volontariste à l'échelle internationale**.

La région du Gharb au Maroc

Observations

Suite à quarante années de développement des infrastructures (barrages et réseaux de distribution), l'agriculture irriguée au Maroc s'inscrit largement, depuis les années 1990, dans une problématique de **désengagement de l'Etat**. Cette évolution, fortement sollicitée par les bailleurs de fonds internationaux, implique de nouvelles contraintes pour les usagers des aménagements. Il s'agit d'abord, pour assurer le recouvrement des coûts de la mobilisation des ressources en eau, de **l'augmentation progressive de la facture d'eau** dans les périmètres irrigués. Si on ajoute à cela les accords de libre échange avec l'Europe et les Etats-Unis, on en déduit que la recherche **d'activités économiquement rentables** devient une priorité de l'agriculture marocaine au détriment, notamment, de l'ambition de stabiliser les variations interannuelles de la production céréalière par l'irrigation. En outre, il est prévu, à moyen terme, qu'une part significative de la gestion des aménagements collectifs soit déléguée aux organisations d'agriculteurs.

A l'échelle du Gharb, on observe que les **règles d'allocations et les contraintes d'accès à l'eau** d'irrigation peuvent constituer un obstacle au développement des cultures à fortes valeurs ajoutées qu'il conviendrait de soutenir pour satisfaire des contraintes plus fortes en termes de rentabilité. Par ailleurs, en nous intéressant au bilan économique et au coût en énergie de l'irrigation dans la production sucrière suivant quatre itinéraires techniques, nous observons que la **canne à sucre irriguée par aspersion** présente des performances relativement médiocres. Plus généralement, les **réseaux collectifs sous-pression**, impliquent des coûts énergétiques importants pour des résultats notamment en termes de maîtrise des apports en eau, qui ne sont pas à la hauteur des prévisions. Enfin les **associations d'usagers de l'eau sont peu structurées** et sont loin de pouvoir assurer les responsabilités pour lesquelles elles ont été conçues.

Au niveau des exploitations, on observe une forte **différence de stratégie** entre les exploitations implantées sur les périmètres collectifs et les exploitations où est pratiquée l'irrigation d'initiative privée. Les cultures pratiquées, les techniques d'irrigation et les règles de pilotage mise en œuvre sont à l'origine des principales différences observées. Nous avons, en outre, constaté qu'il existe un **potentiel d'économie d'eau et d'énergie** dans l'amélioration des règles de pilotage des apports en eau.

Recommandations

A l'échelle territoriale, il serait utile **d'accompagner et de renforcer les organisations d'agriculteurs** dans une réelle optique de développer un service de conseil technique à l'attention de ces derniers. Suite à des discussions avec les exploitants agricoles et des responsables d'associations d'usagers, nous pensons qu'actuellement, et pour différentes raisons, l'ORMVAG, les coopératives agricoles, les récentes association d'usagers de l'eau disposent d'une **capacité relativement restreinte** pour se lancer dans des **programmes de diagnostic** et de conseil de proximité. Cependant de telles démarches initiées dans le cadre de programmes **pilotes** pourraient, selon nous, largement contribuer au renforcement des différentes démarches, d'une part, par la structuration d'équipes opérationnelles, et d'autre part, par la sensibilisation des exploitants à l'utilisation du conseil technique pour le développement de leurs activités.

A l'échelle des exploitations, plusieurs **actions visant à mieux maîtriser les consommations d'eau** sont envisageables. Ce sont notamment : l'amélioration des techniques d'irrigation existantes (minimiser les pertes dans les seguias, rechercher une longueur de raie intermédiaire adaptée au sol et au matériel disponible), l'amélioration du pilotage des apports (réduction des contraintes d'allocation des tours d'eau par la responsabilisation des exploitants et la concertation, campagnes de prélèvement de sol et information systématique sur les réserves utiles des sols, ...). Sur les périmètres équipés de réseaux sous-pression, des **programmes pilotes de soutien à la conversion** des systèmes d'irrigation par aspersion en systèmes d'irrigation localisée pourront être lancés (comme c'est déjà le cas dans d'autres régions du Maroc). Par ailleurs une attention particulière doit être portée à l'évolution du coût des ressources humaines et à la part qu'il représente dans les coûts de l'irrigation notamment dans le cas des techniques traditionnelles.

Sur le deuxième volet, l'essentiel du travail, nous avons élaboré trois outils, portant sur trois échelles, pour l'analyse et la proposition d'actions adaptées dans des cas concrets.

Le **premier outil**, à l'échelle des nations, vise tout d'abord à classer les pays en fonction de la nécessité d'y développer l'irrigation et de celle d'y maîtriser la mobilisation des ressources en eau. Des combinaisons de ces deux aspects ont conduit à définir **quatre contextes** et à proposer pour chacun d'eux **des orientations pour hiérarchiser les objectifs**. Nous avons ainsi pu classer, selon la typologie établie, 80 pays représentant une population de 4,5 Ghab. Soucieux d'exploiter de façon plus détaillée les données disponibles à l'échelle nationale, nous nous sommes ensuite intéressés au potentiel d'amélioration de la production par l'irrigation. Cette démarche a conduit à la proposition de « **fiches pays** » synthétiques que nous avons mises en forme pour 36 pays d'Afrique. Une lecture rapide des fiches pays convaincra le lecteur de la variabilité des contextes, mais surtout de **l'important potentiel de production agricole** que recèlent de nombreux pays d'Afrique. Ces fiches enfin permettent de **définir le niveau d'intensification de la production agricole** à atteindre sur les surfaces irrigables **pour combler les déficits d'approvisionnement nationaux**.

Le **deuxième outil** détaille, à l'échelle d'un **périmètre irrigué ou d'un groupe d'exploitations**, les étapes clés et les moyens à mettre en œuvre pour réaliser un programme de diagnostic approfondi, moyens qui nous ont conduit à formaliser un certain nombre de règles :

- identifier les objectifs,
- valider ces objectifs et les réflexions sur la démarche,
- identifier les actions les plus pertinentes à soutenir pour la zone considérée,
- pour cela, il convient de s'appuyer sur un **groupe de suivi** composé des principaux acteurs concernés par la gestion de l'eau et la production agricole et sur un groupe opérationnel,
- veiller à programmer des phases de dialogue aux différentes étapes de définition et de réalisation du programme,
- soutenir le développement des associations d'exploitants et leur capacité à porter des programmes d'évaluation et d'amélioration technique.

L'échelle territoriale, intermédiaire, est à l'interface entre deux échelles d'action : l'échelle nationale à laquelle se définissent les règles et les stratégies et l'échelle locale à laquelle sont mises en œuvre les décisions pratiques et les actions techniques. A l'échelle territoriale, on rencontre souvent des difficultés qui ne peuvent toutes ensemble être levées que par des voies qui présentent les unes par rapport aux autres des contradictions plus ou moins fortes, voire des oppositions. Il faut, ainsi, tout à la fois, être proche d'une réalité précise et traiter avec efficacité un grand nombre de cas. Il faut, ainsi, **élaborer, à l'échelle territoriale, une lecture originale propre à un contexte particulier** tout en respectant des règles nationales contraignantes. Il faut également passer un message et des compétences à de nombreux acteurs de l'échelle locale avec des moyens humains et financiers réduits. Les méthodes des approches participatives, les études de terrain sont nombreuses et la validité de leurs résultats est incontestable.

Malheureusement, il n'y pas à ce jour de méthodes réellement efficaces qui permettent de transmettre l'information et les compétences avec la même efficacité que les canaux de distribution d'eau ou que les réseaux électriques !

C'est dans ce décor, qui pourrait paraître relever de considérations assez générales, voire banales, que trouve sa place **le troisième outil, à l'échelle de l'exploitation**. Par l'étude des performances, générales puis techniques de l'exploitation, en matière d'utilisation des intrants en eau et en énergie, cet outil, permet tout d'abord de cibler les domaines privilégiés pour l'action. Chaque action est examinée et évaluée en considérant, d'une part, les coûts et bénéfices qu'elle implique et, d'autre part, les conditions requises pour sa mise en oeuvre. Le diagnostic ainsi défini pour les exploitations peut éventuellement être utilisé pour l'examen d'exploitations isolées. Cependant, il présente tout son sens dans le cadre d'un programme de diagnostic approfondi à l'échelle d'un territoire tel que nous l'avons défini pour le deuxième outil. En effet, l'existence d'un cadre et d'une synergie pour la réalisation de diagnostics sur les exploitations permet, d'une part de mobiliser les moyens et les compétences nécessaires et, d'autre part, d'établir les références indispensables pour l'évaluation des performances et des actions dans un contexte donné.

En outre, nous estimons que les actions techniques qui peuvent être recommandées à l'issue d'un diagnostic n'ont de sens que si elles permettent de servir **une réelle stratégie de développement** en accord avec les contraintes économiques des exploitants, les ressources disponibles sur un territoire et les besoins de production d'un pays.

GLOSSAIRE, NOMENCLATURE et CONVERSIONS

Aiguadier - employeur chargé de la surveillance et de la distribution des eaux d'un canal entre les propriétaires riverains.

Coefficients cultureux – coefficients multiplicatifs appliqués à l'évapotranspiration de référence pour déterminer l'évapotranspiration d'une culture. Le coefficient d'une culture évolue en fonction de son stade d'avancement.

Complexité – le comportement d'un système est qualifié de complexe s'il recèle une part d'imprévisibilité potentielle. Le caractère de complexité peut être déclaré par le modélisateur. La notion de complexité apparaît le plus souvent simultanément avec la nécessité d'intégrer un ou plusieurs acteurs humains dans la description d'un système.

Conduite de l'irrigation – ensemble des opérations mise en œuvre par l'exploitant agricole pour réaliser l'apport d'une dose d'irrigation au niveau de la parcelle irriguée avec une technique de répartition de l'eau donnée. Il s'agit notamment de l'ensemble des réglages de débits et d'espacement des distributeurs finaux.

Consommation d'eau – on désigne par consommation d'eau la part des volumes prélevés qui ne sont pas restitués à la ressource après usage. On distingue la consommation par évaporation et par évapotranspiration qui concerne notamment l'irrigation, et la consommation par dégradation de la qualité de l'eau au point qu'elle devient inutilisable. La dégradation de la qualité de l'eau peut résulter d'une mise en contact avec des sites pollués ou salés, ou pour certains usages, d'une dégradation de la qualité au cours de l'utilisation.

Durabilité au sens du développement durable – capacité d'un système à se développer sans amoindrir les moyens de développement des générations futures. Ce concept est souvent présenté comme la recherche d'un équilibre de développement entre les aspects sociaux, environnementaux et économiques.

Durabilité physique – notion à distinguer de la durabilité au sens du développement durable. On définit la durabilité physique comme la durée pendant laquelle on peut mobiliser une ressource à un régime donné (prélèvement, consommation, rejets) sans que n'advienne de pénurie ou de dégradation irréversible de l'environnement. Dans certains, cas le régime de mobilisation de la ressource est tel que la mobilisation peut se prolonger indéfiniment, le régime de mobilisation des ressources peut alors être qualifié de physiquement durable.

Eau virtuelle – eau nécessaire à la production des produits agricoles importés dans un pays. Chaque tonne de denrées alimentaires importée dans un pays permet d'éviter de mobiliser un volume d'eau qui aurait été nécessaire pour réaliser cette production au sein du pays importateur. Suivant que l'on se place du point de vue du pays exportateur ou du point de vue du pays importateur, on distingue les quantités d'eau réellement mobilisées dans le pays de production, des quantités d'eau qui auraient été nécessaires à la production dans le pays importateur.

Eaux bleues – part des précipitations continentales qui contribue au débit des cours d'eau et à l'alimentation des lacs et des nappes souterraines libres ou captives.

Eaux vertes – part des précipitations continentales qui est restituée à l'atmosphère par évaporation des sols et évapotranspiration du couvert végétal naturel et agricole.

Efficacité – aptitude d'un système à satisfaire la fonction pour laquelle il est conçu. L'efficacité peut se définir comme le rapport entre le résultat recherché et l'objectif recherché. L'efficacité n'intègre pas de notion de ressource nécessaire pour la réalisation d'une fonction.

Efficience – part des ressources effectivement mobilisées pour la réalisation d'une fonction qui est strictement utile à cette fonction. En irrigation on définit l'efficience de l'eau comme le rapport entre les volumes d'eau utiles et les volumes d'eau mobilisés. Pour un système d'irrigation on définit une série d'efficience, chacune relative à une fonction du système. On définit également l'efficience en eau du système complet comme le produit des efficience de l'ensemble des fonctions présentes.

Energie commerciale – ensemble des énergies finales qui peuvent être échangées par des relations commerciales.

Energie finale – toute forme d'énergie disponible au niveau du consommateur final.

Energie primaire – forme d'énergie brute non transformée telle qu'elle est disponible immédiatement après captage ou après l'extraction.

Energie utile – forme d'énergie qui contribue directement à la réalisation d'un service énergétique. La chaleur est l'énergie utile des usages thermiques, le travail mécanique est l'énergie utile dans les transports et toutes les actions mécaniques y compris l'irrigation.

Equité – équilibre de la répartition, dans l'espace et entre les catégories sociales et professionnelles, de la disponibilité et de l'accessibilité pour les hommes de certains services jugés nécessaires à une vie décente.

Évapotranspiration (ET₀, ET_M, ET_c) – flux d'eau du sol qui est émis vers l'atmosphère sous forme de vapeur par évaporation du sol et transpiration du couvert végétale. On distingue l'évapotranspiration de référence (ET₀) qui rend compte des conditions climatiques pour une culture de référence, l'évapotranspiration maximale (ET_M) qui correspond à l'évapotranspiration d'une culture qui n'est soumise à aucun stress hydrique, et l'évapotranspiration réelle (ET_c) d'une culture soumise à une alternance de périodes avec stress hydrique et sans stress hydrique.

Exploitation agricole – ensemble des terres, des cultures, du matériel, des infrastructures et des capitaux qui sont sous la responsabilité d'un exploitant agricole et qui relèvent de son activité de production.

Fertigation – pratique qui consiste à réaliser dans un même temps l'irrigation et la fertilisation des cultures en ajoutant des engrais liquides ou dissous dans l'eau d'irrigation. Cette pratique est réservée aux techniques d'irrigation localisées.

FFEM – Fonds Français pour l'Environnement Mondial.

IMC – Indice de masse corporelle, rapport entre la masse corporelle et le carré de la taille d'un individu. L'IMC d'un individu en bonne santé doit être compris entre 18,5 et 24,9 kg/m². Pour une population moyenne la FAO recommande une valeur de 21 kg/m².

INRA de Kénitra – antenne de l'Institut Nationale de la Recherche Agronomique du Maroc pour la région du Gharb.

Intensité énergétique – consommation d'énergie par unité de service rendu ou par unité de valeur ajouté. L'intensité énergétique d'un moyen de transport correspond à la quantité d'énergie requise pour le transport d'une unité de masse sur une distance d'une unité de distance [GJ t⁻¹ km⁻¹].

Lysimètre – appareil permettant de mesurer par pesée l'évaporation d'un échantillon de sol et de culture. Le lysimètre est utilisé pour mesurer l'évapotranspiration.

Niveau d'intensification de la production agricole – caractéristique du système de production agricole qui rend compte de la quantité de la technicité, et de la quantité d'intrants (eau, énergie, fertilisants) mobilisés pour réaliser la production agricole.

ONE – Office National de l'Electricité au Maroc, producteur et distributeur national d'électricité au Maroc.

ORMVAG – Office Régional de Mise en Valeur des terres Agricoles du Gharb, organisme public ayant notamment en charge la gestion et l'entretien des aménagements collectifs d'irrigation.

PAC – Politique Agricole Commune, ensemble des règles en vigueur en Europe pour orienter la production et les échanges agricoles (organes de régulation, subventions, primes, règles d'attribution, quotas, ...).

Périmètre irrigué – zone agricole homogène où est pratiquée l'irrigation. Terme souvent utilisé pour décrire la zone agricole desservie par un réseau collectif d'irrigation.

Pilotage de l'irrigation – ensemble des règles appliquées par un exploitant agricole pour déterminer les dates et les doses des apports en eau d'irrigation.

Prélèvement – action de prélever de l'eau dans la ressource ; le volume des prélèvements correspond à la totalité du volume pompé.

Tour d'eau – période pendant laquelle les infrastructures et/ou la ressource en eau sont rendues disponibles pour l'irrigation au niveau d'une exploitation ou d'une parcelle.

Seguia – canal le plus souvent en terre et de faible section qui permet de distribuer l'eau d'irrigation entre les raies au niveau de la parcelle.

Sous-fonction - élément fonctionnel qui peut être défini par sa contribution partielle à la réalisation d'une fonction plus générale. Par exemple, en irrigation la fonction « transporter l'eau » est une sous-fonction de la fonction plus générale « irriguer » qui est elle-même une sous-fonction de la fonction « produire les végétaux », ...

Nomenclature

A	aire de la section d'écoulement	m ²
AC _{demo}	accroissement démographique	SD
E _{culture}	besoins en eau de la culture dans le contexte climatique considéré déduction faite des précipitations	m ³ ha ⁻¹
BEA	besoin énergétique alimentaire	kcal hab ⁻¹ j ⁻¹
BEC	besoin en énergie alimentaire d'origine céréalière d'un pays	J an ⁻¹
Btcollecte	Besoins de transport pour la collecte	t km
C	paramètre lié à la disparité des besoins et de la répartition de la DEA entre les différentes populations	kcal hab ⁻¹ j ⁻¹
CE _{céréales échangées}	contenu énergétique moyen des céréales échangées : moyenne pondérée des pouvoirs calorifiques des principales céréales échangées	MWh t ⁻¹
CE _{céréales produites}	contenu énergétique moyen des céréales produites : moyenne pondérée des pouvoirs calorifiques des principales céréales produites [MWh. t ⁻¹]	MWh t ⁻¹
CEC	consommation d'énergie alimentaire d'origine céréalière par habitant et par an	kcal hab ⁻¹ j ⁻¹
C _H	un paramètre qui rend compte de l'hétérogénéité de la répartition de la DEA dans la population	SD
C _p	chaleur massique de l'air	MJ kg ⁻¹ K ⁻¹
C _{reduc}	coefficient de réduction du rendement de la culture	SD
C _{sous-nutrition}	coefficient de correction redant compte du besoin d'approvisionnement supplémentaire en cas de DEA faible	SD
D	diamètre de canalisation	m
DEA	disponibilité énergétique alimentaire	kcal hab ⁻¹ j ⁻¹
DEA ₀	valeur de la DEA pour une EAA de 50%	kcal hab ⁻¹ j ⁻¹
Def Appro _{céréales}	déficit d'approvisionnement en céréales : approvisionnement énergétique en céréales manquant pour atteindre une DEA de 2700 kcal hab ⁻¹ j ⁻¹ en conservant les habitudes alimentaires du pays	MWh hab ⁻¹ an ⁻¹
Dj	infiltrations par drainage du jour j	mm
e _a	pression partielle actuelle de la vapeur d'eau dans l'air	kPa
EA _{céréales}	énergie alimentaire contenue dans les céréales dédiées à l'alimentation humaine	kcal hab ⁻¹ j ⁻¹
EAA	efficacité de l'approvisionnement alimentaire	SD
Ec _{céréales}	échange total de céréales : bilan des imports exports et de la mobilisation du stock national	M t
EcE _{céréales}	échange d'énergie alimentaire d'origine céréalière par habitant	MWh hab ⁻¹ an ⁻¹]
Efd	efficacités en eau des réseaux de distribution	SD
Efej	efficacité en eau de la sous-fonction j	SD
Ef _{global}	efficacité en eau globale du système	SD
Efp	efficacité de la répartition de l'eau	SD
Ef _{pilot}	efficacité en eau du pilotage	SD
Efr	efficacité en eau des canaux	SD
Eft	efficacités en eau des réseaux de transport	SD
EP	efficacité de production	SD
e _s	pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air à saturation	kPa
ET	évapotranspiration	mm jour ⁻¹
ET0	évapotranspiration de référence	mm j ⁻¹
ETc	évapotranspiration réelle des cultures tenant compte du stress hydrique	mm
ETM	évapotranspiration maximale d'une culture	mm j ⁻¹
Eutile	énergie utile requise par le système	J
E _{utile spécifique}	énergie utile spécifique du système	J
fsm	fraction du sol mouillée au cours de l'irrigation	SD
G	flux de chaleur provenant du sol	MJ m ⁻² jour ⁻¹
g	accélération de la pesanteur 9,81	m s ⁻²
H _d	pertes de charge pour la distribution	m
hi	hauteur manométrique requise pour le fonctionnement de la sous-fonction i	m
HMT	hauteur manométrique totale	m
Hp	altitude de la parcelle par rapport à la pompe	m
H _r	hauteur de relevage nécessaire pour se conformer à la topographie	m
H _t	perte de charge pour le transport	m
Ij	irrigation du jour j	mm
IMC	Indice de masse corporelle	kg / m ²
k	rugosité du matériau utilisé en transport de l'eau par canalisation	m
Kc	coefficient cultural multiplicateur de l'ET0 intégrant le comportement du sol et de la culture et lié au niveau d'avancement de cette dernière	SD
KcA	valeur caractéristique du coefficient Kc correspondant à la période de levée de la culture	SD
Kcb	coefficient cultural multiplicateur de l'ET0 propre aux cultures	SD
KcB	valeur caractéristique du coefficient Kc correspondant à la période de floraison et de formation des fruits	SD
KcC	valeur caractéristique du coefficient Kc correspondant à la période de maturation des fruits	SD
Kcmax	limite maximum du coefficient Kc	SD
Ke	coefficient d'évaporation du sol	SD

Kr	coefficient de réduction de l'évaporation du sol	SD
Ks	coefficient de réduction de l'évapotranspiration en période de stress hydrique	SD
Ks	coefficient de réduction de l'évapotranspiration	SD
Kyi	coefficient de sensibilité du rendement au stress hydrique de la culture considérée pour la période de croissance i	SD
L	longueur de canalisation	m
M	masse d'eau déplacée	kg
MB	métabolisme de base	kcal / j
n	coefficient de résistance de Manning	$s m^{-1/3}$
P	périmètre mouillé	m
p	fraction moyenne de RU qui est facilement utilisable par la plante	SD
P _d (Q)	pression dynamique	m
PE _{céréales}	production d'énergie alimentaire d'origine céréalière par habitant	MWh hab ⁻¹ an ⁻¹
PEC	production en énergie alimentaire d'origine céréalière annuelle d'un pays	J an ⁻¹
Pj	précipitation du jour j	mm
Pop	population	Mhab
P _{système} (Q)	pression requise par le système d'irrigation complet en fonction du débit	m
Q	débit	$m^3 s^{-1}$
r _a	résistance aérodynamique	$s m^{-1}$
rdt _{céréales}	rendement agricole exprimé en énergie de la culture de céréales	MWh ha ⁻¹ an ⁻¹
Rdt _{conversion}	rendement de conversion	SD
Rdt _{moteur}	rendement énergétique de la motorisation	SD
Rdt _{pompape}	rendement énergétique du pompape (pompe + moteur)	SD
Rdt _{pompe}	rendement énergétique de la pompe	SD
RDU	réserve difficilement utilisable dans la zone des racines	mm
RFE	réserve facilement évaporable	mm
RFU	réserve facilement utilisable dans la zone des racines	mm
Rhs(j)	réserve de l'horizon superficiel du sol au jour j [mm],	mm
Rmj	remontée capillaire du jour j	mm
R _n	rayonnement net	MJ m ⁻² jour ⁻¹
r _s	résistance de surface dans la hauteur des cultures	$s m^{-1}$
RTE	réserve totale évaporable de l'horizon superficiel du sol	mm
RU	réserve utile du sol	mm
r _u	réserve utile par unité de profondeur du sol	mm m ⁻¹
S	réserve en eau restant dans la zone des racines	mm
SI	pente du canal	SD
Sb	section de la buse du distributeur final	m ²
Sc _{céréales}	surface de céréales cultivée par habitant	ha hab ⁻¹
S _j	réserves en eau restant dans le sol aux dates j	mm
T _c	température de l'air	°C
u ₂	vitesse du vent à deux mètres du sol	m s ⁻¹
V	vitesse moyenne de l'écoulement	m s ⁻¹
V	vitesse moyenne de l'eau à la sortie du distributeur final	m s ⁻¹
V	volume d'eau déplacé	m ³
Vd	volume mis à disposition de la culture	m ³
W	travail	J
Z0	profondeur de la graine ou du pied lors de la mise en culture	m
Zr	profondeur des racines	m
Z _{max}	profondeur maximum des racines de la culture considérée	m
γ	constante psychrométrique	kPa K ⁻¹
Δ	pente de la courbe pression de vapeur à saturation à la température de l'air	kPa K ⁻¹
θ _{cc}	capacité au champ	mm m ⁻¹
θf	teneur en eau au point de flétrissement	mm m ⁻¹
λ _e	chaleur latente de vaporisation de l'eau	MJ kg ⁻¹
λ	coefficient de perte de charge	SD
ν	viscosité cinématique de l'eau à la température considérée	m ² s ⁻¹
ρ	masse volumique de l'eau	kg m ⁻³
ρ _a	masse volumique moyenne de l'air	kg m ⁻³
%EA _{céréales}	part des céréales dans la DEA	SD
(e _s -e _a)	déficit de pression de vapeur d'eau pour atteindre la saturation	kPa

Unités et conversions

Energie

J – Joule
cal – calorie = 4,18 J
kWh – kilowattheure = 3,6 MJ
MWh – mégawattheure = 3,6 GJ
tep – tonne équivalent pétrole = 42 GJ

Puissance (énergie par unité de temps)

W – Watt = 1 J / s
C.V. – Cheval vapeur = 736 W (différent du « Horse Power » britannique 745 W)

Pression (force par unité de surface)

Bar = 100000 Pa
Atm – Atmosphère = 101325 Pa
mce – mètre de colonne d'eau = 9810 Pa
Pa – Pascal = 1 Newton / m²

Volume

l – litre = 10⁻³ m³
m³ – mètre cube

Débit

m³/s – mètre cube par seconde
l/s – litre par seconde = 10⁻³ m³/s
m³/h – mètre cube par heure = 1/3600 m³/s ~ 2,78 10⁻⁴ m³/s

Surface

m² - mètre carré
ha – hectare = 10000 m²
km² - kilomètre carré = 10⁶ m²

Puissances de 10

k – kilo = 10³
M – méga = 10⁶
G – giga = 10⁹
T – tera = 10¹²

BIBLIOGRAPHIE*Bibliographie générale*

- ADEME/DIREM, 2002 - Bilans énergétiques et gaz à effet de serre des filières de production de biocarburants en France, <http://www.ademe.fr/partenaires/agrice/htdocs/actus03.asp#ref>, 19 p.
- AGRITAINE, 2001 – L’agriculture en Aquitaine, bilan de campagne 2000, Agritaine dossiers (19), 6 p.
- AKESBI N., 1997 – La question des prix et des subventions au Maroc face aux mutations de la politique agricole, CIHEAM, Options Méditerranéennes, Sér. B / n°11, 81 – 117
- AKESBI N., 2004 – Rapport Annuel 2004 Maroc, Agri.Med, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, 82 p.
- ALLEN L. H., BAKER J. T., BOOTE K. J., 1997 - L'effet fertilisant du CO₂: production et rétention accrues d'hydrates de carbone en termes de rendement en biomasse et en grain, in BAZZAZ F., SOMBROEK W., 1997, op. cit
- ALLEN R.G., PEREIRA L.A., RAES D., SMITH M., 1998 - Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome, Italy, 293 p.
- ANJUM F. M., AHMAD I., BUTT M. S., SHEIKH M. A., PASHA I., 2005 – Amino acid composition of spring wheats and losses of lysine during chapati baking, Journal of Food Composition and Analysis, (18), 523 - 532
- AVENIER M.J., 1997 – La stratégie chemin faisant, economica, Paris, collection stratégie et organisations, 393 p.
- AYRES R. U., 2001 - The minimum complexity of endogenous growth models: the role of physical resource flows, Energy (26), 817–838
- AYRES R. U., WARR B., 2002 – Useful work and information as drivers of growth, INSEAD/CMER, <http://www.insead.edu/CMER/publications/wp/index.htm> , 46 p.
- BAD, 2002 – Rapport sur le développement en Afrique résumé, La Banque Africaine de Développement, Abidjan, 46 p.
- BATCHELOR C., 1999 - Improving water use efficiency as part of integrated catchment management, Agricultural Water Management (40), 249 - 263
- BAZZAZ F., SOMBROEK W., 1997 - Changements du climat et production agricole. Effets directs et indirects du changement des processus hydrologiques, pédologiques et physiologiques des végétaux, FAO, polytechnica, <http://www.fao.org/docrep/W5183F/W5183F00.htm>
- BEACH J., 2003 - The transition to civilization and symbolically stored genomes, Hist. Phil. Biol. & Biomed., (34), 109–141
- BELGHITI M., 2004 - Valorisation de l’eau et tarification dans les périmètres de “grande hydraulique” au Maroc, Actes du séminaire : Modernisation de l’Agriculture Irriguée, www.wademed.net, 14 p.
- BELABBES K., HOUSSEINI I.M., KHETTARI A., ELIAMANI A., 2004 - Amélioration de l'efficacité de la distribution en irrigation gravitaire par revêtement géomembrane du canal arroseur, Actes du séminaire : Modernisation de l’Agriculture Irriguée, www.wademed.net, 14 p.
- BONNET J.F. 1998 – Les apports solaires implicites dans les activités humaines, thèse, Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers, centre de Bordeaux, 395 p.
- BOUAZIZ A., BELABBES K., 2002 – Efficacité productive de l’eau en irrigué au Maroc, Revue Homme terre et eau, Numéro spécial : Conférence Internationale sur les Politiques d’Irrigation : Considération micro et macro économiques, http://www.anafid.org/hte_124.htm , 27p.
- BOUVIER A., 2004 – Management et sciences cognitives, Que sais-je ?, presses universitaires de France, Paris, 128 p.

BIBLIOGRAPHIE

- BP, 2004 – Energy in Focus, BP Statistical Review of World Energy, June 2004, www.bp.com/statisticalreview2004, 40 p.
- BROUWER C., PRINS K., HEIBLOEM M., 1989 - Irrigation Water Management: Irrigation Scheduling, FAO, Rome, <http://www.fao.org/docrep/T7202E/T7202E00.htm>
- BURRI E., PETITTA M. 2004 - Agricultural changes affecting water availability : from abundance to scarcity (Fucino plain, central Italy), Irrigation and Drainage (53), 287–299
- CARRILLO M., GONZALES J. M., 2002 - A new approach to modelling sigmoidal curves, Technological Forecasting & Social Change (69), 233 – 241
- CHABACA M.N., 2004 - L'irrigation gravitaire par micro - raie en Algérie. Propositions pour une amélioration de la pratique ou une modernisation de la technique. Quelles alternatives ? , Actes du séminaire : Modernisation de l'Agriculture Irriguée, www.wademed.net, 17 p.
- CIHEAM, 2004 - Agriculture, pêche, alimentation et développement rural durable dans la région méditerranéenne, Rapport annuel 2004, Agri.Med, Paris, 292 p.
- COMPOARE M. L., 1998 – Irrigation à la parcelle, in TIRECELIN J.R., 1998, op. cit., 429-542
- CONFROTI P., GIAMPIETRO M., 1997 - Fossil energy use in agriculture: an international comparison, Agriculture, ecosystems and environment (65), 231 - 243
- DARRE J.P., 1996 – L'invention des pratiques dans l'agriculture, Vulgarisation et production locale de connaissance, Karthala, Paris, 192 p.
- DERD, 2002 – Situation de l'agriculture marocaine, Ministère de l'agriculture et du développement rural, Direction de l'Enseignement, de la Recherche et du Développement, Rabat, <http://membres.lycos.fr/bamouh/sam2002.htm>, 145 p.
- DESPRES C., 2003 – L'hydraulique en Egypte, DREE, Mission économique du Caire, www.dree.org/egypte, 6 p.
- DEVADAS V., 2001 - Planning for rural energy system: part I, Renewable and Sustainable Energy Reviews (5), 203 – 226
- DEVADAS V., 2001 - Planning for rural energy system: part II, Renewable and Sustainable Energy Reviews (5), 227 – 270
- DEVADAS V., 2001 - Planning for rural energy system: part III, Renewable and Sustainable Energy Reviews (5), 271–297
- DI PAOLO E., et al., 2001 - Yield, water use efficiency, soil water depletion of relay intercropping corn in response to tillage techniques and irrigation regime, I World Congress on Conservation Agriculture, Madrid, 1-5 October, 2001
- DIXON J., GULLIVER A., GIBBON D., 2001 – Global farming systems study: challenges and priorities to 2030, FAO, Rome, <http://www.fao.org/ag/magazine/GFSS.pdf>, 98 p.
- EL HASNAOUI A., RAKI M., BOULASSEL A., 2004 - Diagnostic participatif des freins à la modernisation dans les exploitations irriguées, dans la région du Gharb au Maroc, Actes du séminaire : Modernisation de l'Agriculture Irriguée, www.wademed.net, 7 p.
- EL YACOUBI Z., BELGHITI M., 2002 – Tarification de l'eau d'irrigation au Maroc, Forum sur la gestion de la demande en eau, Beyrouth, juin 2002, 34 p.
- ERMINE J.L., 2000 – Les systèmes de connaissance, deuxième édition revue et augmentée, hermes, Paris, 236p.
- FAO, 1996 a – Sommet mondial de l'alimentation, Rome, http://www.fao.org/wfs/index_fr.htm
- FAO, 1996 b – Production alimentaire : le rôle déterminant de l'eau, documents d'information technique du sommet mondial de l'alimentation, Rome, http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/docrep/003/w2612f/w2612f7a.htm
- FAO, 1997 - La petite irrigation dans les zones arides : principes et options, FAO, Rome, http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/docrep/W3094F/W3094F00.htm
- FAO, 2000 – Performance of on demand pressurized irrigation systems, Bulletin FAO d'Irrigation et de Drainage 59, <ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/idp59.pdf> , 132 p.

- FAO, 2001a - Transfert des Services de Gestion de l'Irrigation – Directives, Bulletin FAO d'Irrigation et de Drainage 58,
http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/DOCREP/003/X2586F/X2586F00.HTM
- FAO, 2001b - Human energy requirements, report of a joint FAO/WHO/UNU expert consultation, food and nutrition technical report series, Rome, 96 p.
- FAO, 2003 a – Agriculture, food and Water,
http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/DOCREP/006/Y4683E/Y4683E00.HTM , 61 p.
- FAO, 2003 b – The state of food insecurity in the world 2003, FAO, Rome, 37 p.
- FAO, 2003c – Food energy – methods of analysis and conversion factors, Food and nutrition paper (77)
- FAO, OMS, UNU, 1986 - Besoins énergétiques et besoins en protéines : rapport d'une consultation conjointe d'experts, série de rapports techniques N° 724, OMS, Genève,
<http://dosei.who.int/uhtbin/cgiisirs/iyGU3vaiNo/81690012/5/0>
- FAO, WHO, 2001 – Human vitamin and mineral requirements, Reports of a joint FAO/Who experts consultation, Bangkok, Thailand, <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/004/y2809e/y2809e00.pdf>, FAO, Rome, 286 p.
- FAYSSE N., 2001 – L'influence des règles collectives d'allocation de l'eau sur les choix stratégiques des agriculteurs, des petits périmètres irrigués tunisiens aux prélèvements en rivière dans le bassin de l'Adour, thèse, Université de Paris X Nanterre, 264 p.
- FENOGLIO J., 2005 - Les scientifiques s'unissent pour comprendre la disparition de la mousson africaine, Le Monde édition du 19/02/2005
- FEUILLETTE S., 2001 – Vers une gestion de la demande sur une nappe en accès libre : exploration des interactions ressources usages par les systèmes multi-agents, Thèse, Université Montpellier II, 344 p.
- GERBENS-LEENES P.W., NONHEBEL S., 2004 - Critical water requirements for food, methodology and policy consequences for food security, Food Policy (29), 547 – 564
- GOOSSENS X., 2000 – Impact des projets d'irrigation en termes de consommation énergétique et d'émission de gaz à effet de serre, rapport pour le Fonds Français pour l'Environnement Mondial, Université Bordeaux 1, 62 p, Paris.
- GOOSSENS X., 2004 – Implications énergétiques de l'irrigation : la place de l'énergie dans la répartition des coûts de l'irrigation en Lot-et-Garonne, Séminaire euro - méditerranéen WADEMED, Rabat – Maroc
- GOOSSENS X., BONNET J-F., 2001 – Etude de la matrice des interactions eau – énergie, In : rapport 2001 du club « Energie prospective et débats », Penser l'avenir pour agir aujourd'hui, Tome 2, Commissariat Général du Plan, pp 789 – 898
- GOOSSENS X, BONNET J-F., 2003 a – Outil d'évaluation « coût-bénéfice » dans les problématiques « eau-énergie » : application à la ville de Jaipur (Inde), rapport d'étude pour le Commissariat Général du Plan, Université Bordeaux 1, 41 p.
- GOOSSENS X., BONNET J-F., 2003 b – Analyse des implications énergétiques de l'irrigation, actes du séminaire CIID, septembre 2003, Montpellier France
- GUILLAUME J., VERMILLION D. L., LAVIGNE DELVILLE P., 1997 – Les conditions d'une gestion paysanne des aménagements hydro-agricoles en Afrique de l'ouest, IIMI, <http://ancien.inter-reseaux.org/publications/enlignes/PDF/dosirig.pdf>, 79 p.
- HADDAD M., LINDNER K., 2001 - Sustainable water demand management versus developing new and additional water in the Middle East: a critical review, Water Policy (3), 143–163
- HCP, 2002 – Le Maroc des régions, Rapport de la Direction de la Statistique du Haut Commissariat du Plan, Royaume du Maroc, <http://www.statistic-hcp.ma/marocdesregions2001.pdf>, 211 p.
- IDD, 1998 - Vers une diminution de la croissance démographique mondiale ?, Indicateur pour le Développement Durable, Bureau de dépôt : Ottignies, (98-2), <http://users.skynet.be/idd/documents/indicateurs/indic98-2.pdf>, 3 p.

BIBLIOGRAPHIE

- IDEL'CIK I.E., 1986 – Memento des pertes de charge, coefficients de pertes de charge singulières et de pertes de charge par frottement, Eyrolles, Paris, 494 p.
- IPCC, 2001a – Bilan 2001 des changements climatiques : les éléments scientifiques, rapport du groupe de travail I du GIEC, OMM, PNUE, www.IPCC.ch, 92 p.
- IPCC, 2001b – Bilan 2001 des changements climatiques : conséquences, adaptation et vulnérabilités, rapport du groupe de travail II du GIEC, OMM, PNUE, www.IPCC.ch, 97 p.
- JACOTOT B., LE PARCO J. C., 1992 – Nutrition et alimentation, 2ème édition, Masson, Paris, 311 p.
- JACQUIN C., MARSAC S., PORTE-LABORDE A., CAMPAGNAUD M., 2004 – Maîtriser les coûts de l'irrigation, Colloque au champ, juin 2004, Recueil de communications, Arvalis, 103 p.
- JAEGER W.K., 2004 – Energy pricing and irrigated agriculture in the upper Klamath Basin, Oregon state University, Brief 3, extension service, 11p.
- JAMES W.P.T., SCOFIELD E.C., 1992 – Les besoins énergétiques de l'homme, Manuel à l'usage des planificateurs et des nutritionnistes, Economica, FAO, Paris, 239 p.
- KASSAM A., SMITH M., 2001 - FAO Methodologies on Crop Water Use and Crop Water Productivity, Expert meeting on crop water productivity, Rome, Paper N° CWP-M07, 18 p.
- KAY M., HATCHO N., 1992 – Small scale pumped irrigation: energy and cost, Irrigation water management training manual, FAO, Rome, 81 p.
- KENNEDY G., NANTEL G., SHETTY P., 2003 - The scourge of "hidden hunger": global dimensions of micronutrient deficiencies, Food Nutrition and Agriculture (32), 8 – 16
- KIMBALL B. A., Kobayashi K., Bindi M. , 2002 - Responses of agricultural crops to free-air CO2 enrichment, advances in agronomy, volume 77, 2002, 293-368
- KIRSTE B., HEINAU V., 1998 – Amino acids, Institute of Chemistry, Berlin, http://www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/bio/amino-acids_en.html
- KOMOR P., 1995 – Reducing energy use in US freight transport, Transport policy, (2), 119 - 128
- KUMAR D., 2005 - Impact of electricity prices and volumetric water allocation on energy and groundwater demand management: analysis from Western India, Energy Policy, (33), 39 – 51
- LAVAL-MARTIN D., Mazliak P., 1995 - Physiologie végétale I, Nutrition et métabolisme, Herman, Paris, 539 p.
- LE BARBE L., LEBEL T., 1997 - Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950-1990, Journal of Hydrology (188-189), 43-73
- LE BARBE L., LEBEL T., TAPSOBA D., 2002 - Rainfall Variability in West Africa during the Years 1950–90, Journal of Climate (15), 187 - 202
- LE COTTY T., VOITURIEZ T., 2004 – Coordination des politiques agricoles et compensation internationales, Les notes de l'IDDRI n° 6, <http://www.iddri.org/iddri/html/publi/publi.htm> , 14 p.
- LE MOIGNE J.L., 1995 – Les épistémologies constructives, deuxième édition corrigée - 1999, Que sais-je ?, P.U.F., Paris, 128 p.
- LE MOIGNE J.L., 1999 – La modélisation des systèmes complexes, Dunod, Paris, 178 p.
- LENCASTRE A., 1996 – Manuel d'hydraulique générale, Eyrolles, réédition 1999, 633 p.
- LESHAN J., YOUNG W., 2001 - Water use in agriculture in China: importance, challenges, and implications for policy, Water Policy (3), 215 – 228
- LLOYD-LANEY M., 2003 – Making knowledge networks work for the poor, Intermediate Technology Development Group, <http://www.itcltd.com/docs/mknwp%20project%20final%20report.pdf> , 25 p.
- LONG S.P., 1991 - Modification of the response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric CO2 concentrations: has its importance been underestimated ? Plant, Cell and Environment 14, 729- 739 PAS LU
- LOUHICHI K., 1999 - L'amélioration de l'efficacité de l'irrigation pour une économie d'eau : cas d'un périmètre irrigué en Tunisie, CIHEAM, Plan Bleu, <http://www.planbleu.org/pdf/rapTunisieEau.pdf>, 57 p.

- LUC J.P., TARHOUNI J., CALVEZ R., LIMAN M., SABLAYROLLES C., 2004 - Performances des stations de pompages en irrigation : application aux forages de petits périmètres irrigués de la plaine de Kairouan (Tunisie) et impact des dysfonctionnements sur le prix de l'eau, Actes du Séminaire : Modernisation de l'Agriculture Irriguée, www.wademed.net, 18 p.
- MAILHOL J.C., 2001 – Contribution à l'amélioration des pratiques d'irrigation à la raie par une modélisation simplifiée à l'échelle de la parcelle et de la saison, Thèse, Montpellier, <http://www.montpellier.cemagref.fr/doc/publications/theses/jclaud-mailhol.html>, 276 p.
- MAILHOL J.C., 2005 – Contribution à la maîtrise de l'irrigation et de ses impacts, Habilitation à diriger les recherches, Montpellier, http://www.montpellier.cemagref.fr/doc/publications/theses/ft/hdr_jc-mailhol.pdf, 106 p.
- MAHDI M., ERRAHJ M., ELAMRANI M., KAMMOUN H. – 2004, Stratégies des exploitations agricoles familiales face aux nouveaux défis de l'irrigation. Quelques hypothèses, Actes du Séminaire : Modernisation de l'Agriculture Irriguée, www.wademed.net, 15 p.
- MOREAU F., PRAT R., 2004 - Cours sur Internet – La photosynthèse, Biologie et Multimédia, Université Pierre et Marie Curie, UFR de Biologie, Internet : <http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Photosynthese-cours/index.htm>
- MOLLE B. 2005 - Choix des matériels d'irrigation en fonction de leurs performances – Des adaptations possibles pour une meilleure maîtrise des arrosages, Colloque « eau et agriculture durable », SIMA, Paris, <http://www.cemagref.fr/Informations/Actualites/colloque/sima05/molle.pdf>, 7 P.
- MOUGHLI L., 2000 – Les engrais minéraux caractéristiques et utilisations, bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTTA (72), <http://www.iav.ac.ma/pntta/bul72.htm>, 4 p.
- NEMETH I., 2001 – Devenir de l'azote sous irrigation gravitaire, application au cas d'un périmètre irrigué au Mexique, thèse, Université de Montpellier II, 214 p.
- OMI, UNICEF, 2004 – Carences en vitamines et en minéraux, rapport sur les progrès dans le monde, <http://www.micronutrient.org/reports/report.asp?cntry=Full>, 39 p.
- OWEIS T., HACHUM A., KIJNE J., 1999 - Water Harvesting and Supplemental Irrigation for Improved Water Use Efficiency in Dry Areas, System-Wide Initiative on Water Management paper (7), International Water Management Institute, <http://www.iwmi.cgiar.org/pubs/SWIM/>, 41 p.
- PASSMORE R., Nicol B. M., Narayana Rao M., 1974 – Manuel sur les besoins nutritionnels de l'homme, FAO, OMS, Rome, 64 p.
- PATUREL J.E., LUBES H., SERVAT E., DELATTRE M.O., 1996 – Etude de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne, XII^{èmes} Journées hydrologiques de l'ORSTOM, <http://www.cig.enscm.fr/~hydro/ACT/ORSTOMXII/VENDREDI/PATUREL/PATUREL.PDF>, Montpellier, 8 p.
- PEREIRA L.S., OWEIS T., ZAIRI, 2002 – Irrigation management under water scarcity, agricultural water management (57), 175 – 206
- PERVANCON F., BOCKSTALLER C., GIRARDIN P., 2002 - Assessment of energy use in arable farming systems by means of an agro-ecological indicator: the energy indicator, Agricultural Systems (72), 149 – 172
- PIMENTEL D., PIMENTEL M., 1979 – Food energy and Society, Ressource and environmental sciences series, Edward Arnold, London, 165 p.
- PINTUS F., 1997 – La gestion de l'eau à Shushay-Egypte : un exemple de recompositions sociales et techniques en milieu rural, Centre National d'Etude Agronomique des Régions Chaudes, Montpellier, 124 p.
- PNTTA, 1999 – Economie de l'eau d'irrigation, bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTTA (58), <http://www.iav.ac.ma/pntta/58.pdf>, 4 p.
- PNTTA, 2000 – Valorisation de l'eau d'irrigation par les productions végétales dans les grands périmètres irrigués au Maroc, bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTTA (66), <http://www.iav.ac.ma/pntta/bul66.htm>, 4 p.
- PNUD, 2001 – Rapport mondial sur la développement humain 2001, Programme des Nation Unies pour le Développement, De Boeck et Larquier, Paris, 91 p.

BIBLIOGRAPHIE

- RAFIQUL I., WEBER C., LEHMANN B., VOSS A., 2005 - Energy efficiency improvements in ammonia production—perspectives and uncertainties, *Energy* (30), 2487 – 2504
- RAGAB R., PRUDHOMME C. 2002 - Climate Change and Water Resources Management in Arid and Semi-arid Regions: Prospective and Challenges for the 21st Century, *Biosystems Engineering* (81), 3-34
- REGWA, 1999 – Technical report for well : Darb El Arbaein (Area two) well – (23), Egypt, General Authority for reclamation projects and Development, central department for groundwater, 40 p.
- RIJSBERMAN F.R., 2000 – World water scenarios: analysis, working draft, 396 p.
- ROYAUME du MAROC, 2003 – Alphabétisation des adultes au Maroc, Bilan de la période 1997 – 2003, Rapport National, Direction de la lutte contre l'analphabétisme, <http://www.unesco.org/education/uie/pdf/country/Morocco.pdf>, 12 p.
- SAFEGE, 2000 – Jaipur water supply and sanitation project feasibility study, Main Report, Republic of India, Government of Rajasthan, Public Health Engineering Department, 74 p.
- SOTT C., SHAH T., BUECHLER S., 2001 - Energy Pricing and Supply for Groundwater Demand Management Lessons from Mexican Agriculture, IWMI, water policy programm, <http://www.iwmi.org/iwmi-tata>, 6 p.
- SCOTT K. J., RODRIGUEZ-AMAYA D., 2000 – Pro- vitamin A carotenoids conversion factors: retinol equivalents – fact or fiction ?, *Food chemistry* (69), 125 - 127
- SCHIPPER L., SCHOLL L., PRICE L., 1996 – Energy use and carbon emissions from freight in 10 industrialized countries: an analysis of trends from 1973 to 1992, *Transportation Research*, part D, (2), 57 - 76
- SINGH H., MISHRA D., NAHAR N.M., 2002 - Energy use pattern in production agriculture of a typical village in arid zone, India: part I, *Energy Conversion and Management* (43), 2275 – 2286
- SINGH H., MISHRA D., NAHAR N.M., RANJAN M., 2003 - Energy use pattern in production agriculture of a typical village in arid zone, India: part II, *Energy Conversion and Management* (44), 1053 – 1067
- SIVANAPPAN R.K., 1997 - Technologies for water harvesting and soil moisture conservation in small watersheds for small-scale irrigation, *Irrigation Technology Transfer in Support of Food Security*. (Water Reports - 14) <http://www.fao.org/docrep/W7314E/w7314e00.htm#Contents>
- SHAH T., HUSSAIN I., REHMAN S., 2000 - Irrigation Management in Pakistan and India: Comparing Notes on Institutions and Policies, Colombo, Sri Lanka: IWMI, working paper 4, 15p.
- SHAH T., SCOTT C., PEESAPATY N., KISHOR A., SHRAM A., 2003 – The water-energy nexus in India : Approaches to agrarian prosperity with a viable power industry, USAID/INDIA, http://www.waterenergyxexus.com/downloads/pdfs/Metering_Concepts_White_Paper.pdf, 27 p.
- SHIKLOMANOV I.A., 1998 – Assessment of water resources and water availability in the world, Report for the comprehensive assessment of the freshwater resources of the world, United Nations, St. Petersburg, Russia
- SMITH M., FERERES E., KASSAM A., 2001 - Crop water productivity under deficient water supply, Expert Meeting on Crop Water Productivity Under Deficient Water Supply, 3–5 December 2001, Rome, Italy
- SOLAGRO, 2003 – Quel avenir pour le maïs irrigué ? , www.solagro.org
- TERRE ET VIE, 2001 - Le Gharb, hier, aujourd'hui et demain, *Terre et Vie* (47), <http://membres.lycos.fr/marocagri/Pages/693.html>
- TIERCELIN J.R., 1998 – Traité d'irrigation, Lavoisier Tec & Doc, Paris, 1011 p.
- TUBIELLO F. N., EWERT F., 2002 - Simulating the effects of elevated CO2 on crops: approaches and applications for climate change, *European journal of agronomy*, volume 18, 2002, 57 – 74
- TWOMLOM S., O'NEIL D., SIMS B., ELLIS-JONES J., JAFRY T., 2002 - An engineering perspective on sustainable smallholder farming in developing countries, *Biosystems Engineering* (81), 355 – 362

- UNSWORTH M. H., HOGSETT W. E., 1997 - Les effets combinés de changements en CO₂, en O₃, de température et de rayonnement UV-B sur la croissance des cultures, in Bazzaz F., Sombroek W., 1997, op. cit
- UTSET A., FARRÉ I., MARTÍNEZ-Cob A., CAVERO J., 2004 - Comparing Penman–Monteith and Priestley–Taylor approaches as reference-evapotranspiration inputs for modeling maize water-use under Mediterranean conditions, *Agricultural Water Management* 66 (2004), 205–219
- VAN DE GEIJN S.C., GOUDRIAAN J., 1997 - Les effets d'une teneur élevée en CO₂ et d'un changement de température sur la transpiration et l'utilisation de l'eau par les cultures, in Bazzaz F., Sombroek W., 1997, op. cit
- VIDAL A., RIGOURD C., NEPVEU DE VILLEMARCEAU A., 2004 – Identification et diffusion de bonnes pratiques sur les périmètres irrigués en Afrique de l'Ouest, FAO, IPTRID, Rome, 46 p.
- VILAIN M., 1997 – La production végétale, les composantes de la production, volume 1, troisième édition, Lavoisier tech, paris, 478 p.
- WALLACE J.S., 2000 - Increasing agricultural water use efficiency to meet future food production, *Agriculture ecosystems and environment* (82), pp 105 – 119
- WELCH R.M., GRAHAM R.D., 2005 - Agriculture: the real nexus for enhancing bioavailable micronutrients in food crops, *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, article in press, 9 p.
- WHO, 1995 – Physical status : The use and interpretation of anthropometry, report of a WHO expert committee, Who technical report series N° 854, Geneva, 452 p.
- WHO, 2002 – Turning the tide of malnutrition. Responding to the challenge of the 21st century, http://www.who.int/nut/documents/nhd_brochure.pdf, 20 p.
- WORLD BANK, UNDP, 2002 - Energy Strategies for Rural India: Evidence from Six States, Energy Sector Management Assistance Programme, (ESM 258 / 02), <http://www-wds.worldbank.org/>, 174 p.
- WRI, 2004 – Data tables Part II (2002 – 2004), World resources Institute, <http://earthtrends.wri.org/datatables/governance> , 232 - 283
- YACOUBI SOUSSANE M., 1999 – Les ressources en eau au Maroc, bilan, perspectives et plan d'action, Rapport, Institut Méditerranéen de l'Eau, http://www.gwpmmed.org/products_documents/country_reports/morocco.pdf, 61 p.

Banques de données consultées

Banque de donnée HYDRO	http://hydro.rnde.tm.fr/accueil.html
BP STAT	http://www.bp.com
CENSUS of INDIA	http://www.censusindia.net/
FAOSTAT, CLIMAWAT et AQUASTAT	http://www.fao.org
INSEE	http://www.insee.fr
US CENSUS Bureau	http://www.census.gov/ipc/www/idbpyr.html
WRI	http://www.wri.org/

Publications et contributions scientifiques de l'auteur

GOOSSENS X., 2000 – Impact des projets d'irrigation en termes de consommation énergétique et d'émission de gaz à effet de serre, rapport pour le Fonds Français pour l'Environnement Mondial, Université Bordeaux 1, 62 p, Paris.

GOOSSENS X., BONNET J-F., 2001 – Etude de la matrice des interactions eau – énergie, In : rapport 2001 du club « Energie prospective et débats », Penser l'avenir pour agir aujourd'hui, Tome 2, Commissariat Général du Plan, pp 789 – 898

GOOSSENS X., 2001 – Utilisation productive des énergies renouvelables : étude de cas pour l'irrigation basse pression, Business and investment forum for renewable energy sources in the Mediterranean region, Marakkech, Morocco, 14-17 may 2001, 445-449

GOOSSENS X, BONNET J-F., 2003 a – Outil d'évaluation « coût-bénéfice » dans les problématiques « eau-énergie » : application à la ville de Jaïpur (Inde), rapport d'étude pour le Commissariat Général du Plan, Université Bordeaux 1, 41 p.

GOOSSENS X., BONNET J-F., 2003 b – Analyse des implications énergétiques de l'irrigation, actes du séminaire CIID, 14-19 septembre 2003, Montpellier France, <http://afeid.montpellier.cemagref.fr/mpl2003/AtelierTechno/AtelierTechno/Papier%20Entier/Goossens.pdf>, 32 p

GOOSSENS X., 2004 – Implications énergétiques de l'irrigation : la place de l'énergie dans la répartition des coûts de l'irrigation en Lot-et-Garonne, Séminaire euro - méditerranéen WADEMED « la modernisation de l'agriculture irriguée », 19-23 avril 2004, Rabat – Maroc, 11 p

FICHE PAYS

Algérie

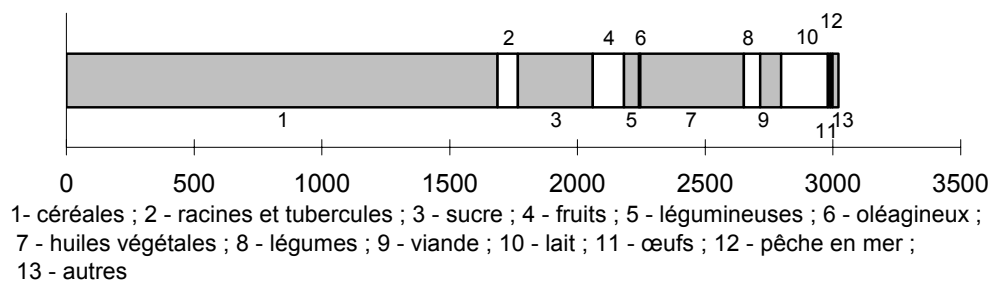
Année des données : 2002

Population	31,27	Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002)	1,7%	. an ⁻¹
DEA	3022	kcal. hab ⁻¹ . j ⁻¹
Part des céréales	55%	
Approvisionnement en céréales	9,493	Mt . an ⁻¹
Soit	0,991	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Production	0,200	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Import - ΔStock - Export	0,792	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Déficit d'approvisionnement *	0,000	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Utilisation des céréales		
Alimentation humaine	72%	
Alimentation animale	18%	
Autres usages et pertes	10%	
Agriculture (surface cultivée)	8,265	Mha
Surface cultivée	0,2643	ha . hab ⁻¹
<i>dont céréales</i>	0,059	ha . hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	3,38	MWh . ha ⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004)	0,861	MWh . ha ⁻¹
Irrigation	0,560	Mha
Surface irriguée	0,0179	ha . hab ⁻¹
Surface irrigable	0,0233	ha . hab ⁻¹
Ressources en eau	14,32	Gm ³ . an ⁻¹
Volume d'eau disponible	458	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
Volume d'eau mobilisé	194	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
<i>dont volume utilisé pour l'irrigation</i>	126	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹

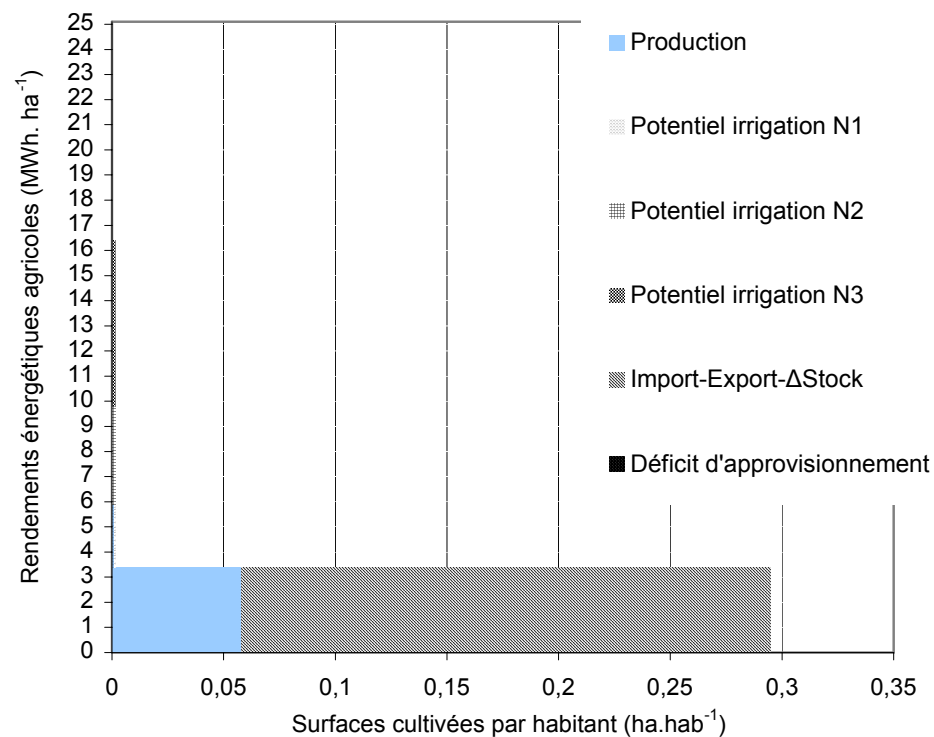
* déficit en céréales pour atteindre 55% de 2700 kcal.hab⁻¹.j⁻¹

Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹.j⁻¹



Approvisionnement en céréales et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Angola

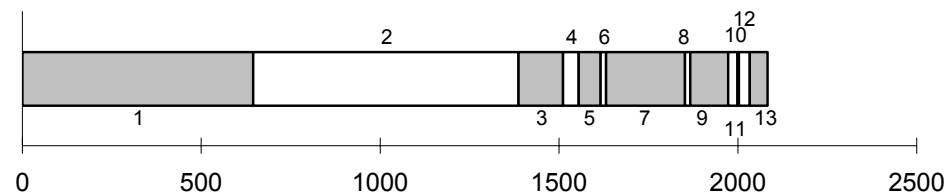
Année des données : 2002

Population	13,18	Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002)	3,3%	. an ⁻¹
DEA	2083	kcal. hab ⁻¹ . j ⁻¹
Part des céréales	31%	
Approvisionnement en céréales	1,125	Mt . an ⁻¹
Soit	0,396	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Production	0,163	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Import - ΔStock - Export	0,152	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Déficit d'approvisionnement *	0,081	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Utilisation des céréales		
Alimentation humaine	86%	
Alimentation animale	2%	
Autres usages et pertes	12%	
Agriculture (surface cultivée)	3,3	Mha
Surface cultivée	0,2503	ha . hab ⁻¹
<i>dont céréales</i>	0,086	ha . hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	1,89	MWh . ha ⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004)	0,432	MWh . ha ⁻¹
Irrigation	0,075	Mha
Surface irriguée	0,0057	ha . hab ⁻¹
Surface irrigable	0,5082	ha . hab ⁻¹
Ressources en eau	184	Gm ³ . an ⁻¹
Volume d'eau disponible	13956	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
Volume d'eau mobilisé	26	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
<i>dont volume utilisé pour l'irrigation</i>	16	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹

* déficit en céréales pour atteindre 31% de 2700 kcal . hab⁻¹ . j⁻¹

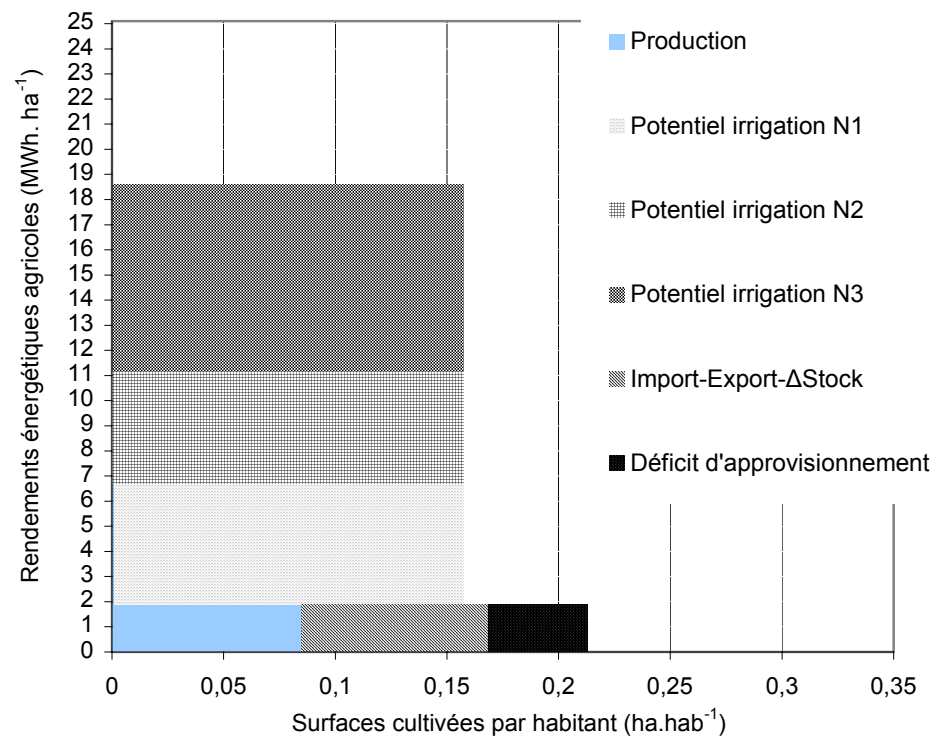
Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹ . j⁻¹



1- céréales ; 2 - racines et tubercules ; 3 - sucre ; 4 - fruits ; 5 - légumineuses ; 6 - oléagineux ; 7 - huiles végétales ; 8 - légumes ; 9 - viande ; 10 - lait ; 11 - œufs ; 12 - pêche en mer ; 13 - autres

Approvisionnement en céréales et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Bénin

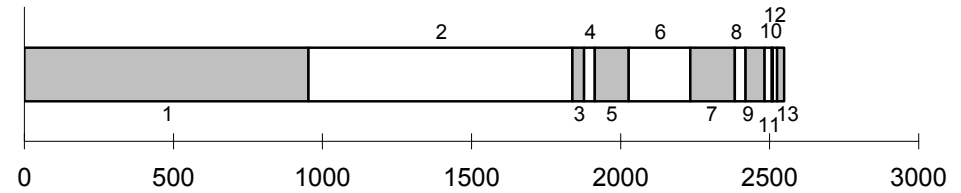
Année des données : 2002

Population	6,56	Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002)	2,7%	. an ⁻¹
DEA	2548	kcal. hab ⁻¹ . j ⁻¹
Part des céréales	37%	
Approvisionnement en céréales	1,100	Mt . an ⁻¹
Soit	0,614	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Production	0,484	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Import - ΔStock - Export	0,106	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Déficit d'approvisionnement *	0,024	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Utilisation des céréales		
Alimentation humaine	67%	
Alimentation animale	9%	
Autres usages et pertes	24%	
Agriculture (surface cultivée)	2,815	Mha
Surface cultivée	0,4292	ha . hab ⁻¹
<i>dont céréales</i>	0,149	ha . hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	3,24	MWh . ha ⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004)	0,264	MWh . ha ⁻¹
Irrigation	0,012	Mha
Surface irriguée	0,0018	ha . hab ⁻¹
Surface irrigable	0,0457	ha . hab ⁻¹
Ressources en eau	24,8	Gm ³ . an ⁻¹
Volume d'eau disponible	3782	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
Volume d'eau mobilisé	38	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
<i>dont volume utilisé pour l'irrigation</i>	28	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹

* déficit en céréales pour atteindre 37% de 2700 kcal .hab⁻¹ . j⁻¹

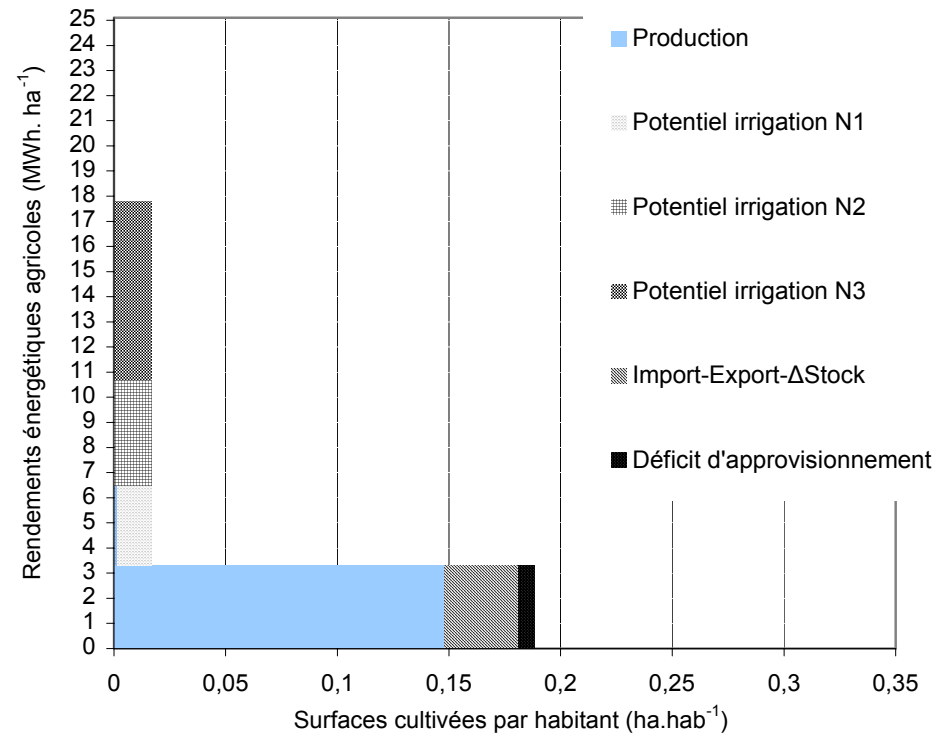
Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹ . j⁻¹



1- céréales ; 2 - racines et tubercules ; 3 - sucre ; 4 - fruits ; 5 - légumineuses ; 6 - oléagineux ; 7 - huiles végétales ; 8 - légumes ; 9 - viande ; 10 - lait ; 11 - œufs ; 12 - pêche en mer ; 13 - autres

Approvisionnement en céréales et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Burkina Faso

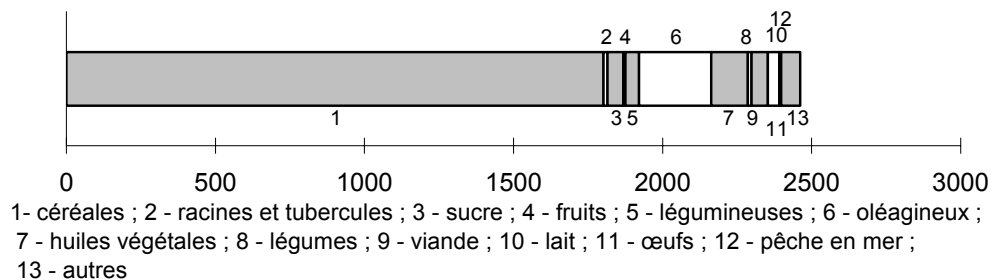
Année des données : 2002

Population	12,62	Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002)	3,0%	. an ⁻¹
DEA	2462	kcal. hab ⁻¹ . j ⁻¹
Part des céréales	73%	
Approvisionnement en céréales	3,206	Mt . an ⁻¹
Soit	0,957	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Production	0,854	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Import - ΔStock - Export	0,029	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Déficit d'approvisionnement *	0,074	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Utilisation des céréales		
Alimentation humaine	86%	
Alimentation animale	0%	
Autres usages et pertes	14%	
Agriculture (surface cultivée)	4,4	Mha
Surface cultivée	0,3485	ha . hab ⁻¹
<i>dont céréales</i>	0,262	ha . hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	3,26	MWh . ha ⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004)	0,324	MWh . ha ⁻¹
Irrigation	0,025	Mha
Surface irriguée	0,002	ha . hab ⁻¹
Surface irrigable	0,013	ha . hab ⁻¹
Ressources en eau	12,5	Gm ³ . an ⁻¹
Volume d'eau disponible	990	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
Volume d'eau mobilisé	62	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
<i>dont volume utilisé pour l'irrigation</i>	54	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹

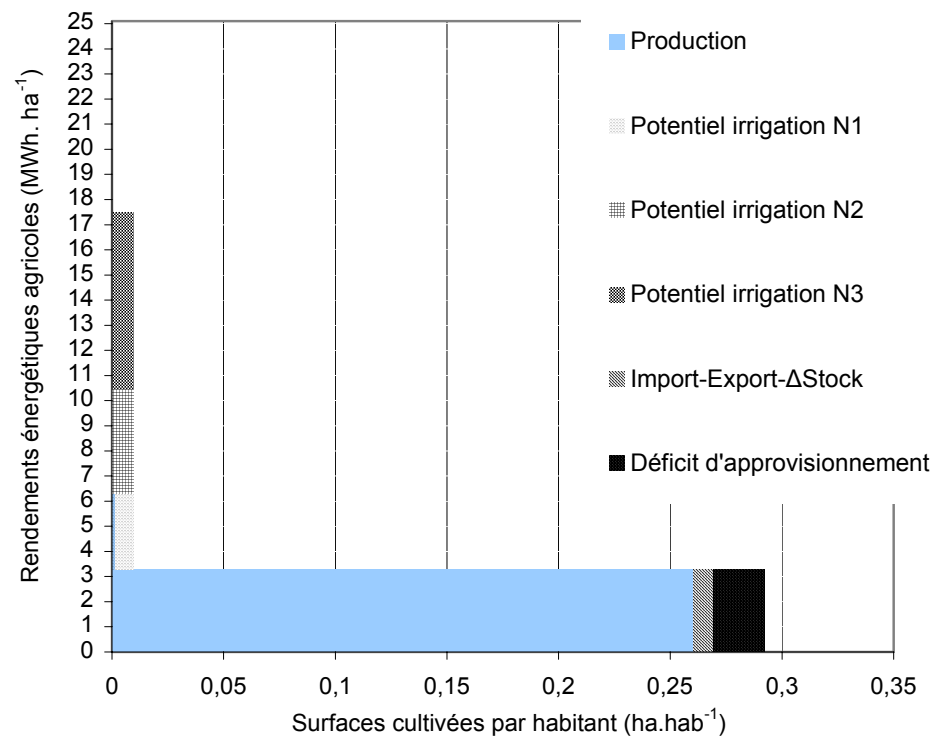
* déficit en céréales pour atteindre 73% de 2700 kcal . hab⁻¹ . j⁻¹

Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹ . j⁻¹



Approvisionnement en céréales et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Cameroun

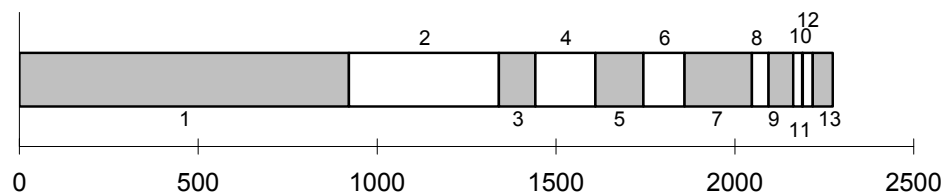
Année des données : 2002

Population	15,73	Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002)	1,9%	.an ⁻¹
DEA	2273	kcal. hab ⁻¹ .j ⁻¹
Part des céréales	39%	
Approvisionnement en céréales	1,857	Mt .an ⁻¹
Soit	0,507	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Production	0,336	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Import - ΔStock - Export	0,100	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Déficit d'approvisionnement *	0,071	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Utilisation des céréales		
Alimentation humaine	87%	
Alimentation animale	0%	
Autres usages et pertes	13%	
Agriculture (surface cultivée)	7,16	Mha
Surface cultivée	0,4552	ha . hab ⁻¹
<i>dont céréales</i>	0,051	ha . hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	6,54	MWh . ha ⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004)	1,068	MWh . ha ⁻¹
Irrigation	0,033	Mha
Surface irriguée	0,0021	ha . hab ⁻¹
Surface irrigable	0,0153	ha . hab ⁻¹
Ressources en eau	285,5	Gm ³ . an ⁻¹
Volume d'eau disponible	18151	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
Volume d'eau mobilisé	63	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
<i>dont volume utilisé pour l'irrigation</i>	46	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹

* déficit en céréales pour atteindre 39% de 2700 kcal .hab⁻¹ .j⁻¹

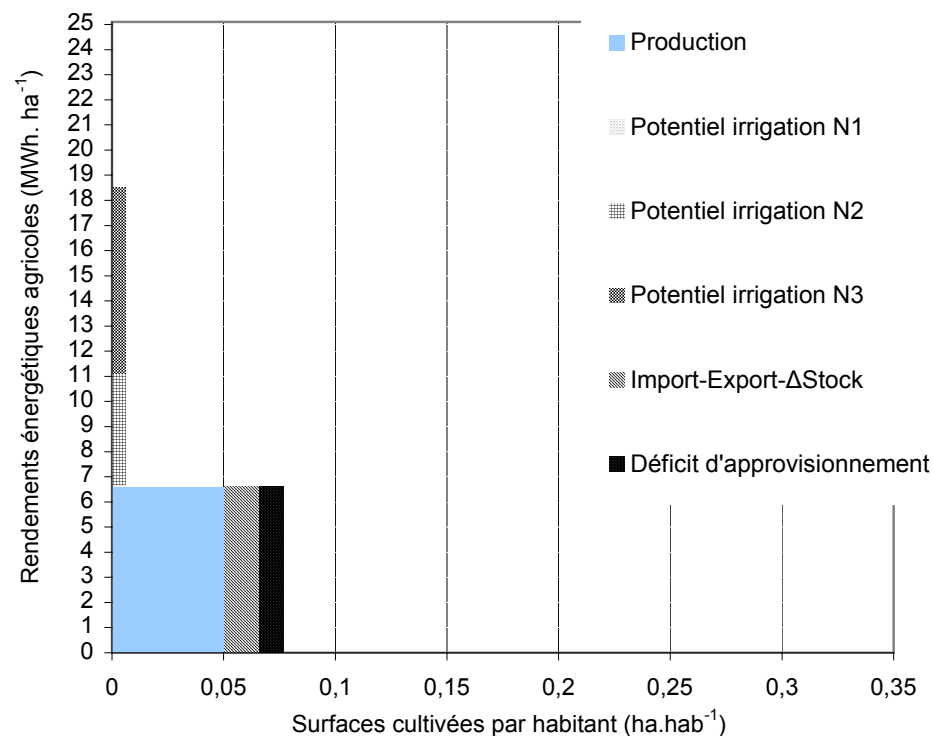
Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹ .j⁻¹



1- céréales ; 2 - racines et tubercules ; 3 - sucre ; 4 - fruits ; 5 - légumineuses ; 6 - oléagineux ; 7 - huiles végétales ; 8 - légumes ; 9 - viande ; 10 - lait ; 11 - œufs ; 12 - pêche en mer ; 13 - autres

Approvisionnement en céréales et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Rep. Dem. Congo

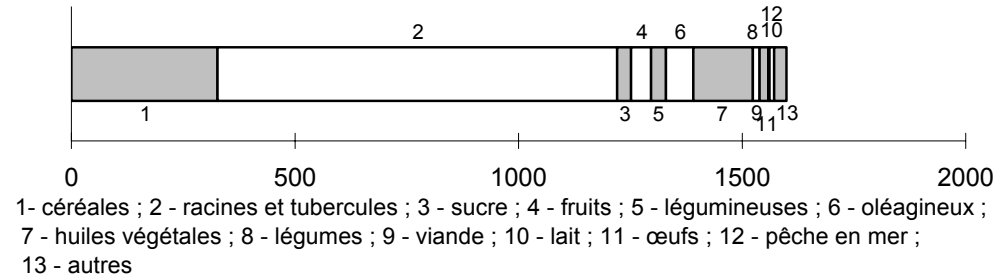
Année des données : 2002

Population	51,20	Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002)	2,8%	.an ⁻¹
DEA	1599	kcal. hab ⁻¹ .j ⁻¹
Part des céréales	20%	
Approvisionnement en céréales	2,223	Mt . an ⁻¹
Soit	0,251	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Production	0,108	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Import - ΔStock - Export	0,049	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Déficit d'approvisionnement *	0,095	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Utilisation des céréales		
Alimentation humaine	87%	
Alimentation animale	4%	
Autres usages et pertes	9%	
Agriculture (surface cultivée)	7,8	Mha
Surface cultivée	0,1523	ha . hab ⁻¹
dont céréales	0,039	ha . hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	2,75	MWh . ha ⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004)	0,038	MWh . ha ⁻¹
Irrigation	0,011	Mha
Surface irriguée	0,0002	ha . hab ⁻¹
Surface irrigable	0,0781	ha . hab ⁻¹
Ressources en eau	1283	Gm ³ . an ⁻¹
Volume d'eau disponible	25058	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
Volume d'eau mobilisé	7	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
dont volume utilisé pour l'irrigation	2	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹

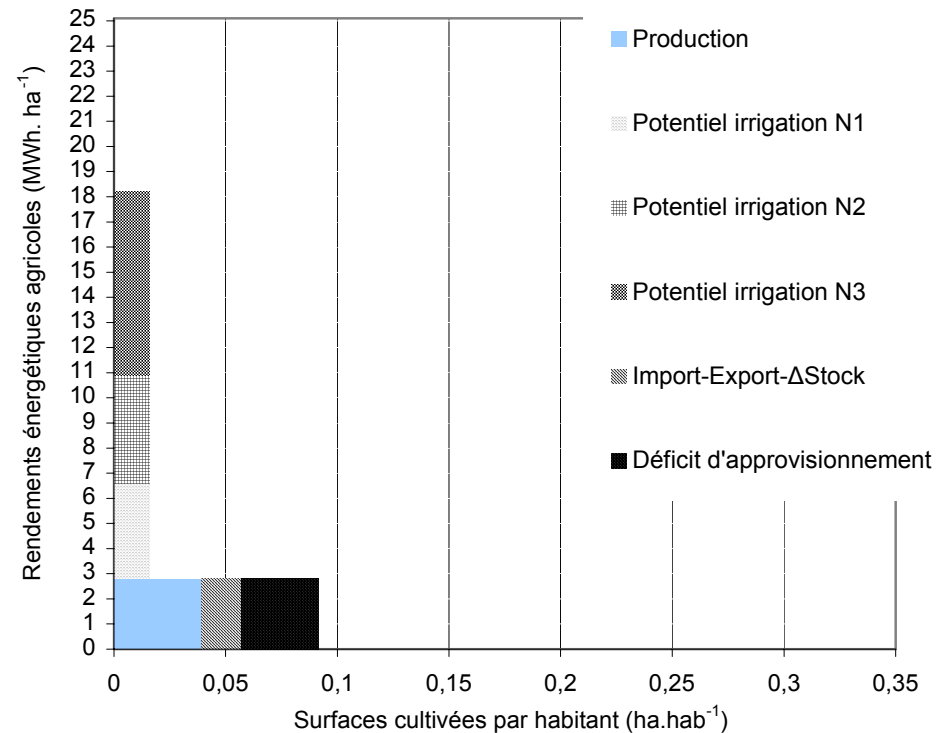
* déficit en céréales pour atteindre 20% de 2700 kcal .hab⁻¹ .j⁻¹

Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹ .j⁻¹



Approvisionnement en céréales et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Egypte

Année des données : 2002

Population	70,51	Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002)	2,0%	.an ⁻¹
DEA	3338	kcal. hab ⁻¹ .j ⁻¹
Part des céréales	64%	
Approvisionnement en céréales	27,348	Mt .an ⁻¹
Soit	1,516	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Production	0,973	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Import - ΔStock - Export	0,543	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Déficit d'approvisionnement *	0,000	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹

Utilisation des céréales

Alimentation humaine	61%
Alimentation animale	29%
Autres usages et pertes	10%

Agriculture (surface cultivée)

Surface cultivée	3,4	Mha
dont céréales	0,0482	ha . hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	0,038	ha . hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	25,41	MWh . ha ⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004)	2,000	MWh . ha ⁻¹

Irrigation

Surface irriguée	3,400	Mha
Surface irrigable	0,0482	ha . hab ⁻¹
Surface irrigable	0,0629	ha . hab ⁻¹

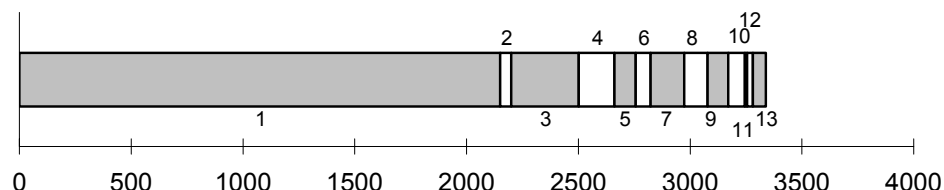
Ressources en eau

Volume d'eau disponible	58,3	Gm ³ . an ⁻¹
Volume d'eau mobilisé	827	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
dont volume utilisé pour l'irrigation	974	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹

* déficit en céréales pour atteindre 64% de 2700 kcal .hab⁻¹ .j⁻¹

Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

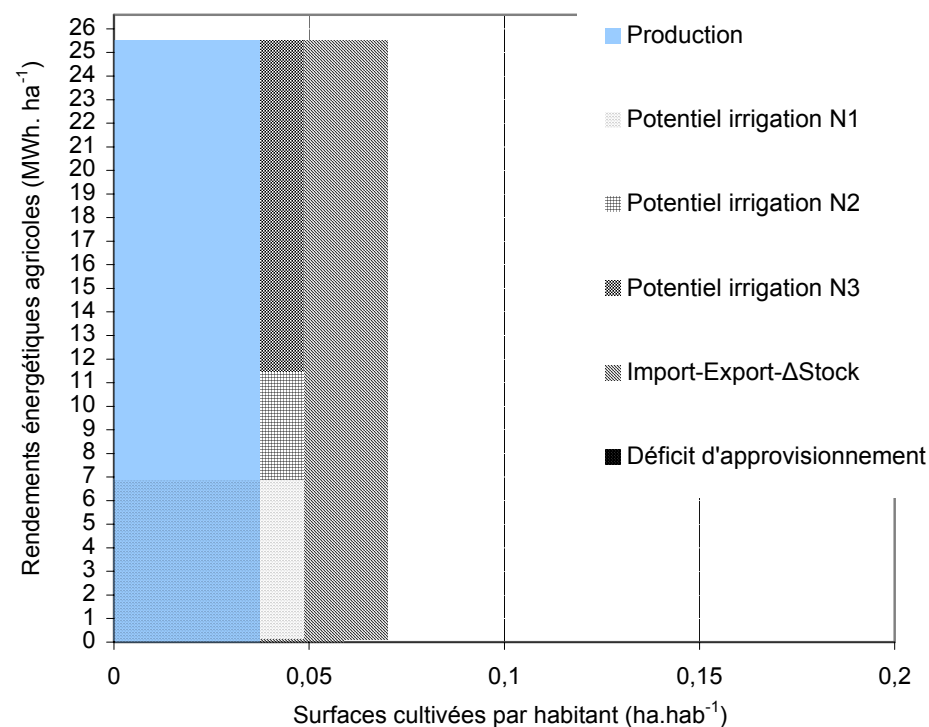
Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹ .j⁻¹



1- céréales ; 2- racines et tubercules ; 3- sucre ; 4- fruits ; 5- légumineuses ; 6- oléagineux ; 7- huiles végétales ; 8- légumes ; 9- viande ; 10- lait ; 11- œufs ; 12- pêche en mer ; 13- autres

Approvisionnement en céréales

et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Ethiopie

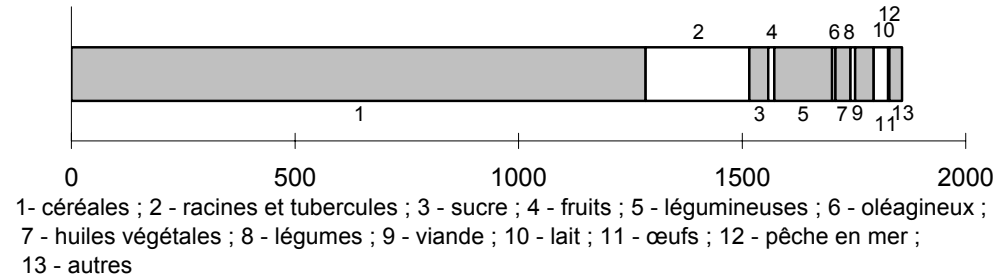
Année des données : 2002

Population	68,96	Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002)	2,5%	.an ⁻¹
DEA	1857	kcal. hab ⁻¹ .j ⁻¹
Part des céréales	68%	
Approvisionnement en céréales	10,703	Mt . an ⁻¹
Soit	0,839	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Production	0,507	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Import - ΔStock - Export	0,089	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Déficit d'approvisionnement *	0,244	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Utilisation des céréales		
Alimentation humaine	90%	
Alimentation animale	1%	
Autres usages et pertes	9%	
Agriculture (surface cultivée)	10,671	Mha
Surface cultivée	0,1547	ha . hab ⁻¹
dont céréales	0,098	ha . hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	5,16	MWh . ha ⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004)	0,455	MWh . ha ⁻¹
Irrigation	0,190	Mha
Surface irriguée	0,0028	ha . hab ⁻¹
Surface irrigable	0,0527	ha . hab ⁻¹
Ressources en eau	110	Gm ³ . an ⁻¹
Volume d'eau disponible	1595	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
Volume d'eau mobilisé	38	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
dont volume utilisé pour l'irrigation	36	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹

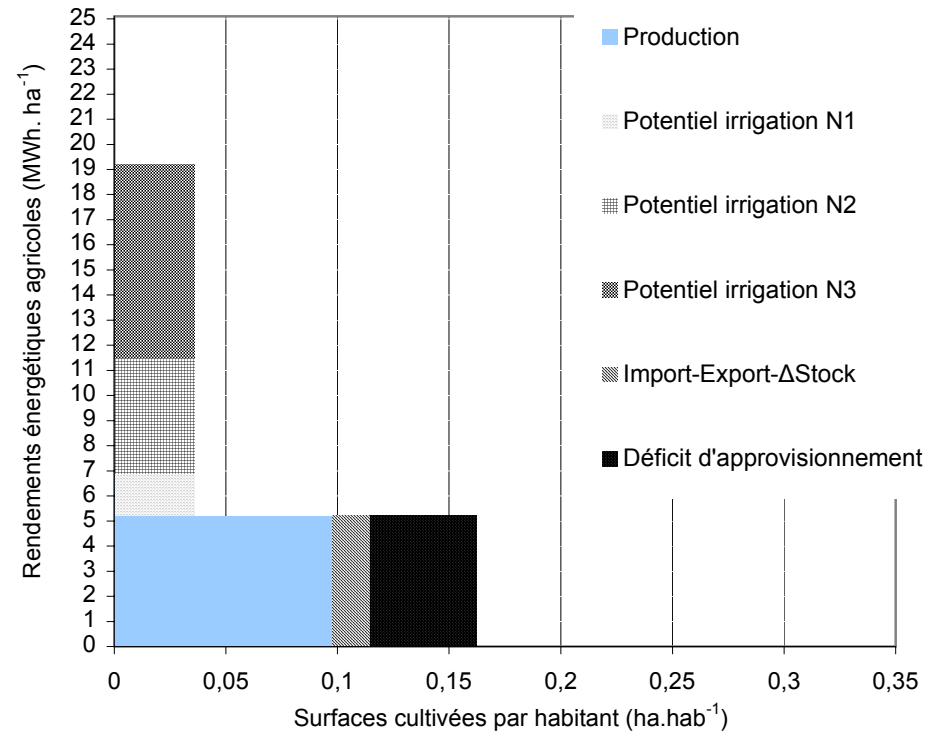
* déficit en céréales pour atteindre 68% de 2700 kcal .hab⁻¹ .j⁻¹

Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹ .j⁻¹



Approvisionnement en céréales et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Gambie

Année des données : 2002

Population 1,39 Mhab
 Accroissement annuel (2001 - 2002) 2,7% .an⁻¹

DEA 2273 kcal. hab⁻¹.j⁻¹
 Part des céréales 53%

Approvisionnement en céréales 0,269 Mt .an⁻¹
 Soit 0,795 MWh . hab⁻¹.an⁻¹
 Production 0,339 MWh . hab⁻¹.an⁻¹
 Import - ΔStock - Export 0,361 MWh . hab⁻¹.an⁻¹
 Déficit d'approvisionnement * 0,095 MWh . hab⁻¹.an⁻¹

Utilisation des céréales
 Alimentation humaine 74%
 Alimentation animale 8%
 Autres usages et pertes 19%

Agriculture (surface cultivée) 0,255 Mha
 Surface cultivée 0,1837 ha . hab⁻¹
dont céréales 0,097 ha . hab⁻¹
 Rendement moyen (céréales) 3,51 MWh . ha⁻¹
 Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004) 0,499 MWh . ha⁻¹

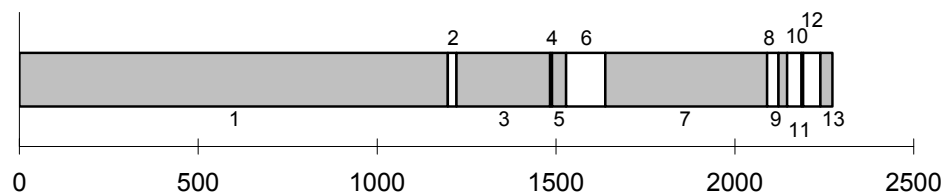
Irrigation 0,002 Mha
 Surface irriguée 0,0014 ha . hab⁻¹
 Surface irrigable 0,0576 ha . hab⁻¹

Ressources en eau 8 Gm³ . an⁻¹
 Volume d'eau disponible 5764 m³ . hab⁻¹ . an⁻¹
 Volume d'eau mobilisé 23 m³ . hab⁻¹ . an⁻¹
dont volume utilisé pour l'irrigation 15 m³ . hab⁻¹ . an⁻¹

* déficit en céréales pour atteindre 53% de 2700 kcal .hab⁻¹ .j⁻¹

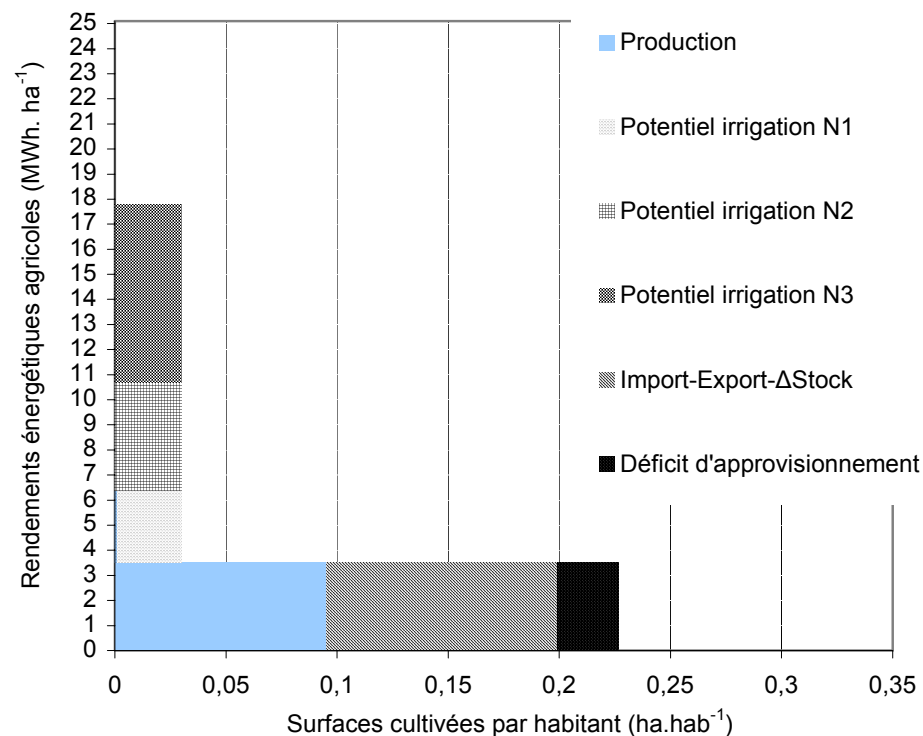
Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹ .j⁻¹



1- céréales ; 2 - racines et tubercules ; 3 - sucre ; 4 - fruits ; 5 - légumineuses ; 6 - oléagineux ;
 7 - huiles végétales ; 8 - légumes ; 9 - viande ; 10 - lait ; 11 - œufs ; 12 - pêche en mer ;
 13 - autres

Approvisionnement en céréales et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Ghana

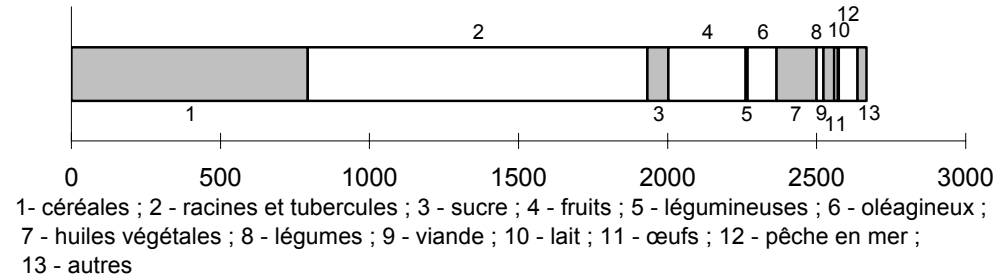
Année des données : 2002

Population	20,47	Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002)	2,2%	.an ⁻¹
DEA	2667	kcal. hab ⁻¹ .j ⁻¹
Part des céréales	29%	
Approvisionnement en céréales	2,436	Mt . an ⁻¹
Soit	0,437	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Production	0,368	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Import - ΔStock - Export	0,065	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Déficit d'approvisionnement *	0,004	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Utilisation des céréales		
Alimentation humaine	78%	
Alimentation animale	3%	
Autres usages et pertes	19%	
Agriculture (surface cultivée)	6,331	Mha
Surface cultivée	0,3093	ha . hab ⁻¹
<i>dont céréales</i>	0,078	ha . hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	4,71	MWh . ha ⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004)	0,257	MWh . ha ⁻¹
Irrigation	0,011	Mha
Surface irriguée	0,0005	ha . hab ⁻¹
Surface irrigable	0,0928	ha . hab ⁻¹
Ressources en eau	53,2	Gm ³ . an ⁻¹
Volume d'eau disponible	2599	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
Volume d'eau mobilisé	25	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
<i>dont volume utilisé pour l'irrigation</i>	12	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹

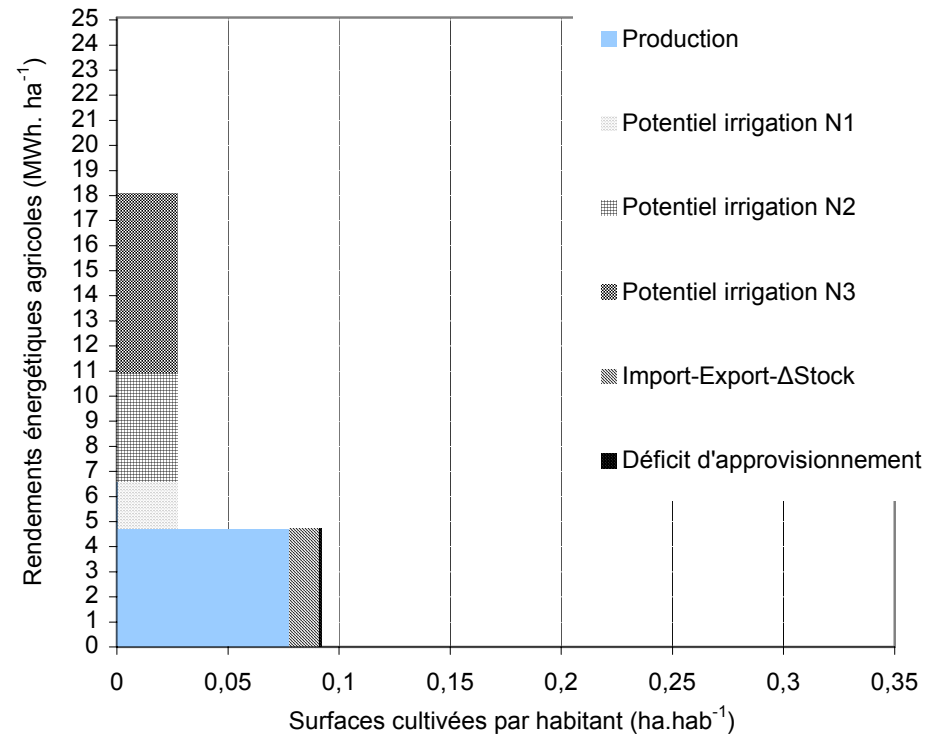
* déficit en céréales pour atteindre 29% de 2700 kcal .hab⁻¹ .j⁻¹

Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹ .j⁻¹



Approvisionnement en céréales et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Guinée

Année des données : 2002

Population 8,36 Mhab
 Accroissement annuel (2001 - 2002) 1,4% . an⁻¹

DEA 2409 kcal. hab⁻¹. j⁻¹
 Part des céréales 44%

Approvisionnement en céréales 1,157 Mt . an⁻¹
 Soit 0,606 MWh . hab⁻¹. an⁻¹
 Production 0,386 MWh . hab⁻¹. an⁻¹
 Import - ΔStock - Export 0,166 MWh . hab⁻¹. an⁻¹
 Déficit d'approvisionnement * 0,054 MWh . hab⁻¹. an⁻¹

Utilisation des céréales
 Alimentation humaine 82%
 Alimentation animale 0%
 Autres usages et pertes 18%

Agriculture (surface cultivée) 1,54 Mha
 Surface cultivée 0,1842 ha . hab⁻¹
 dont céréales 0,092 ha . hab⁻¹
 Rendement moyen (céréales) 4,19 MWh . ha⁻¹
 Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004) 0,317 MWh . ha⁻¹

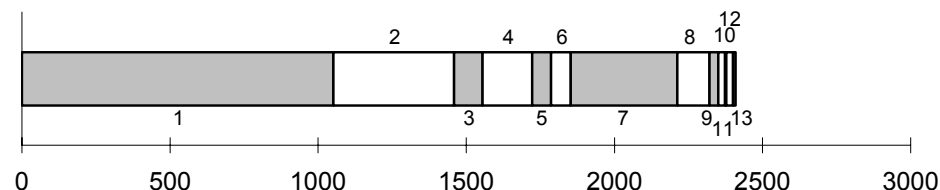
Irrigation 0,095 Mha
 Surface irriguée 0,0114 ha . hab⁻¹
 Surface irrigable 0,0622 ha . hab⁻¹

Ressources en eau 226 Gm³ . an⁻¹
 Volume d'eau disponible 27037 m³ . hab⁻¹. an⁻¹
 Volume d'eau mobilisé 181 m³ . hab⁻¹. an⁻¹
 dont volume utilisé pour l'irrigation 163 m³ . hab⁻¹. an⁻¹

* déficit en céréales pour atteindre 44% de 2700 kcal . hab⁻¹ . j⁻¹

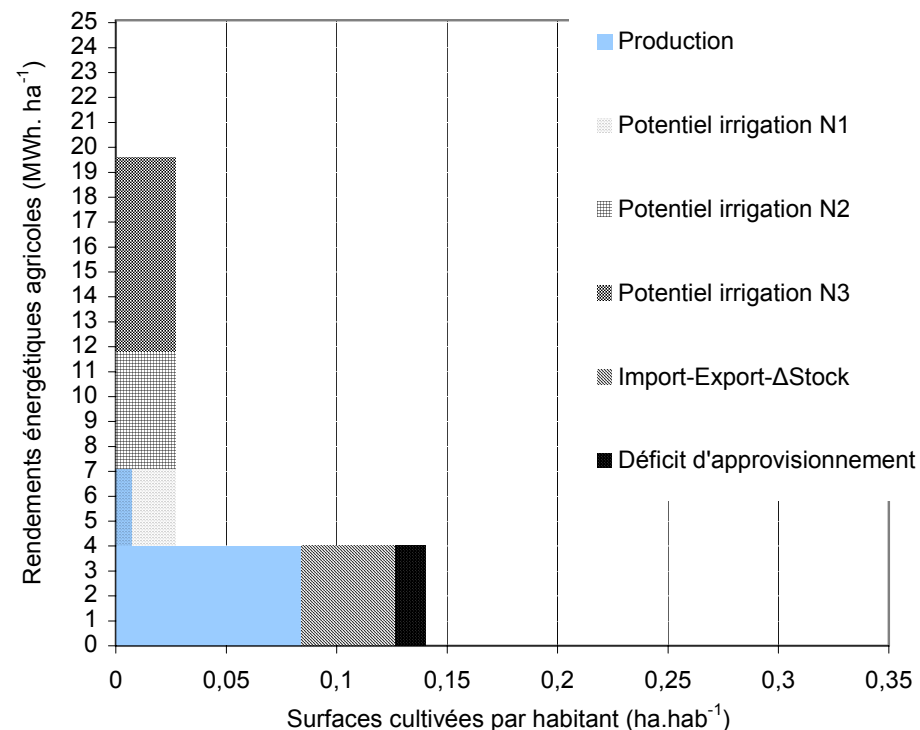
Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹. j⁻¹



1- céréales ; 2 - racines et tubercules ; 3 - sucre ; 4 - fruits ; 5 - légumineuses ; 6 - oléagineux ;
 7 - huiles végétales ; 8 - légumes ; 9 - viande ; 10 - lait ; 11 - œufs ; 12 - pêche en mer ;
 13 - autres

Approvisionnement en céréales et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Guinée-Bissau

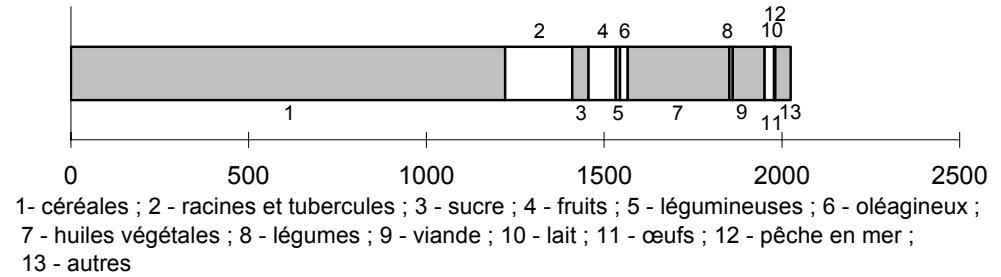
Année des données : 2002

Population	1,45	Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002)	3,0%	. an ⁻¹
DEA	2024	kcal. hab ⁻¹ . j ⁻¹
Part des céréales	60%	
Approvisionnement en céréales	0,215	Mt . an ⁻¹
Soit	0,762	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Production	0,334	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Import - ΔStock - Export	0,257	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Déficit d'approvisionnement *	0,171	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Utilisation des céréales		
Alimentation humaine	87%	
Alimentation animale	5%	
Autres usages et pertes	8%	
Agriculture (surface cultivée)	0,548	Mha
Surface cultivée	0,3782	ha . hab ⁻¹
<i>dont céréales</i>	0,096	ha . hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	3,48	MWh . ha ⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004)	0,563	MWh . ha ⁻¹
Irrigation	0,017	Mha
Surface irriguée	0,0117	ha . hab ⁻¹
Surface irrigable	0,1941	ha . hab ⁻¹
Ressources en eau	31	Gm ³ . an ⁻¹
Volume d'eau disponible	21394	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
Volume d'eau mobilisé	76	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
<i>dont volume utilisé pour l'irrigation</i>	69	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹

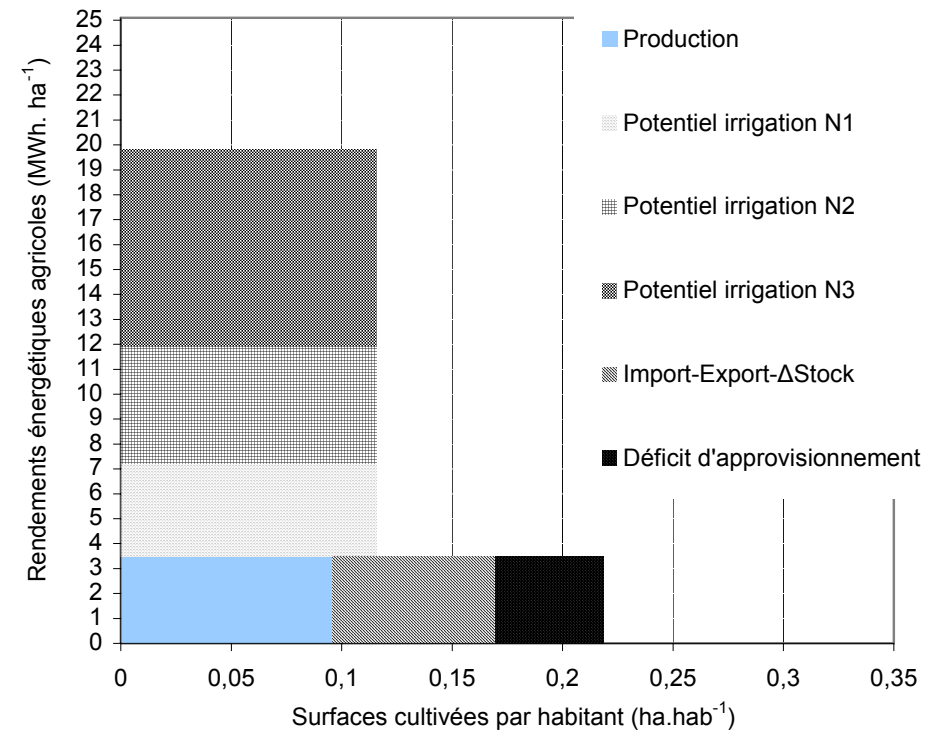
* déficit en céréales pour atteindre 60% de 2700 kcal . hab⁻¹ . j⁻¹

Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹ . j⁻¹



Approvisionnement en céréales et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Kenya

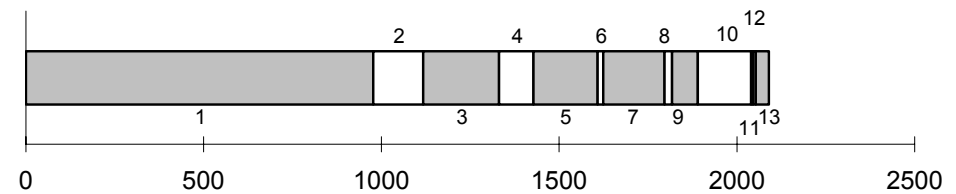
Année des données : 2002

Population	31,54	Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002)	1,5%	. an ⁻¹
DEA	2090	kcal. hab ⁻¹ . j ⁻¹
Part des céréales	46%	
Approvisionnement en céréales	3,871	Mt . an ⁻¹
Soit	0,555	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Production	0,315	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Import - ΔStock - Export	0,120	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Déficit d'approvisionnement *	0,120	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Utilisation des céréales		
Alimentation humaine	93%	
Alimentation animale	2%	
Autres usages et pertes	4%	
Agriculture (surface cultivée)	5,162	Mha
Surface cultivée	0,1637	ha . hab ⁻¹
<i>dont céréales</i>	0,060	ha . hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	5,28	MWh . ha ⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004)	0,668	MWh . ha ⁻¹
Irrigation	0,090	Mha
Surface irriguée	0,0029	ha . hab ⁻¹
Surface irrigable	0,0112	ha . hab ⁻¹
Ressources en eau	30,2	Gm ³ . an ⁻¹
Volume d'eau disponible	958	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
Volume d'eau mobilisé	50	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
<i>dont volume utilisé pour l'irrigation</i>	32	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹

* déficit en céréales pour atteindre 46% de 2700 kcal.hab⁻¹.j⁻¹

Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

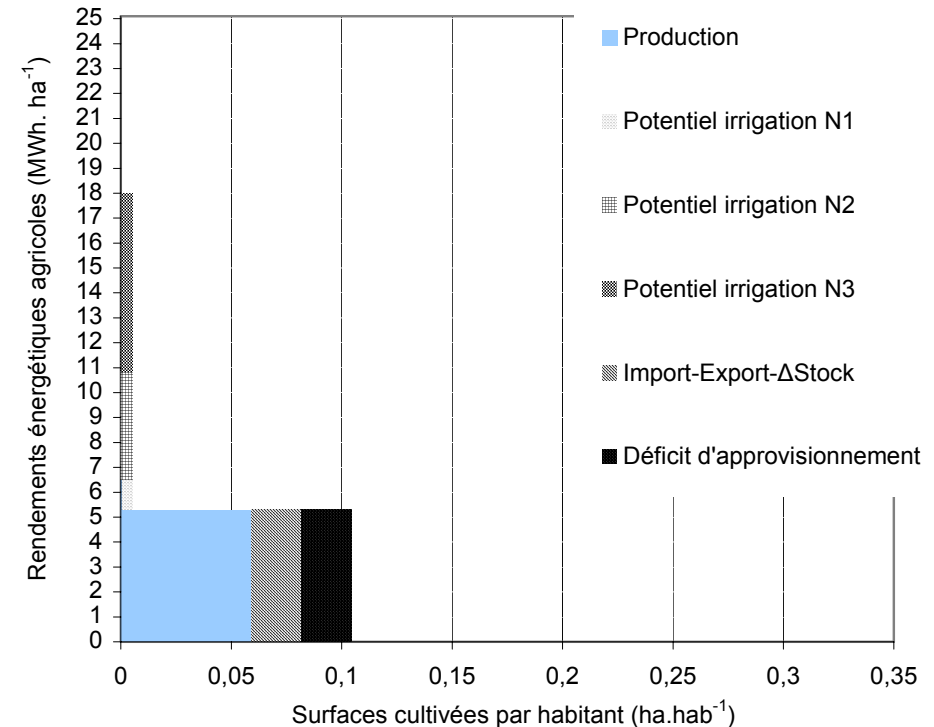
Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹.j⁻¹



1- céréales ; 2 - racines et tubercules ; 3 - sucre ; 4 - fruits ; 5 - légumineuses ; 6 - oléagineux ; 7 - huiles végétales ; 8 - légumes ; 9 - viande ; 10 - lait ; 11 - œufs ; 12 - pêche en mer ; 13 - autres

Approvisionnement en céréales

et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Lesotho

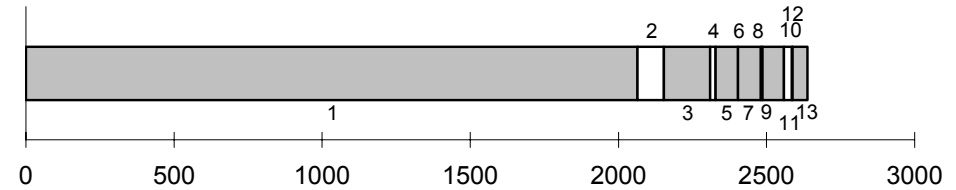
Année des données : 2002

Population	1,80	Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002)	0,3%	. an ⁻¹
DEA	2638	kcal. hab ⁻¹ . j ⁻¹
Part des céréales	78%	
Approvisionnement en céréales	0,530	Mt . an ⁻¹
Soit	1,076	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Production	0,379	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Import - ΔStock - Export	0,676	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Déficit d'approvisionnement *	0,020	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Utilisation des céréales		
Alimentation humaine	83%	
Alimentation animale	3%	
Autres usages et pertes	14%	
Agriculture (surface cultivée)	0,334	Mha
Surface cultivée	0,1856	ha . hab ⁻¹
<i>dont céréales</i>	0,104	ha . hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	3,63	MWh . ha ⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004)	0,586	MWh . ha ⁻¹
Irrigation	0,001	Mha
Surface irriguée	0,0006	ha . hab ⁻¹
Surface irrigable	0,0069	ha . hab ⁻¹
Ressources en eau	3,022	Gm ³ . an ⁻¹
Volume d'eau disponible	1679	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
Volume d'eau mobilisé	30	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
<i>dont volume utilisé pour l'irrigation</i>	6	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹

* déficit en céréales pour atteindre 78% de 2700 kcal . hab⁻¹ . j⁻¹

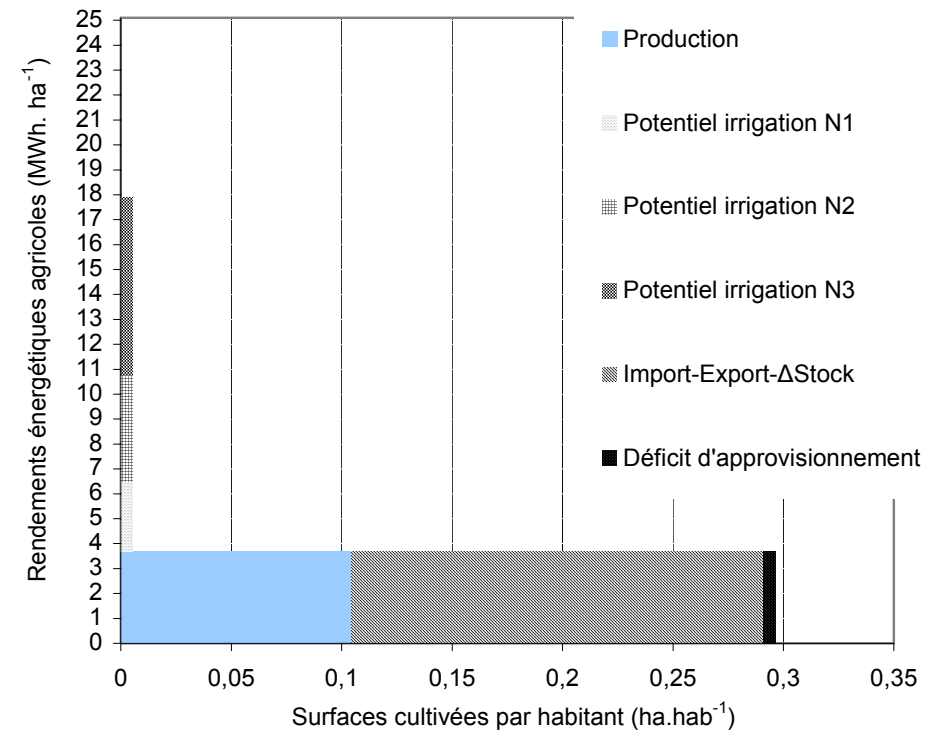
Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹ . j⁻¹



1- céréales ; 2 - racines et tubercules ; 3 - sucre ; 4 - fruits ; 5 - légumineuses ; 6 - oléagineux ; 7 - huiles végétales ; 8 - légumes ; 9 - viande ; 10 - lait ; 11 - œufs ; 12 - pêche en mer ; 13 - autres

Approvisionnement en céréales et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Libéria

Année des données : 2002

Population 3,24 Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002) 4,5% . an⁻¹

DEA 1900 kcal. hab⁻¹. j⁻¹
Part des céréales 39%

Approvisionnement en céréales 0,324 Mt . an⁻¹
Soit 0,524 MWh . hab⁻¹. an⁻¹
Production 0,097 MWh . hab⁻¹. an⁻¹
Import - ΔStock - Export 0,296 MWh . hab⁻¹. an⁻¹
Déficit d'approvisionnement * 0,131 MWh . hab⁻¹. an⁻¹

Utilisation des céréales
Alimentation humaine 78%
Alimentation animale 15%
Autres usages et pertes 6%

Agriculture (surface cultivée) 0,6 Mha
Surface cultivée 0,1852 ha . hab⁻¹
dont céréales 0,037 ha . hab⁻¹
Rendement moyen (céréales) 2,61 MWh . ha⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004) 0,610 MWh . ha⁻¹

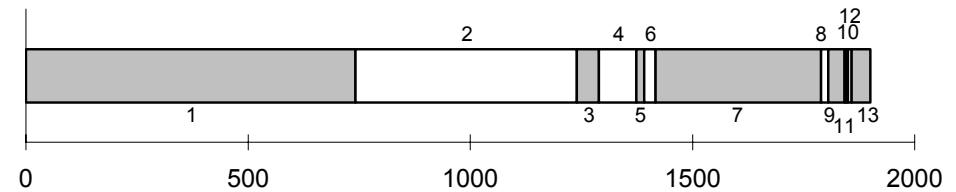
Irrigation 0,003 Mha
Surface irriguée 0,0009 ha . hab⁻¹
Surface irrigable 0,1852 ha . hab⁻¹

Ressources en eau 232 Gm³ . an⁻¹
Volume d'eau disponible 71627 m³ . hab⁻¹. an⁻¹
Volume d'eau mobilisé 33 m³ . hab⁻¹. an⁻¹
dont volume utilisé pour l'irrigation 19 m³ . hab⁻¹. an⁻¹

* déficit en céréales pour atteindre 39% de 2700 kcal . hab⁻¹ . j⁻¹

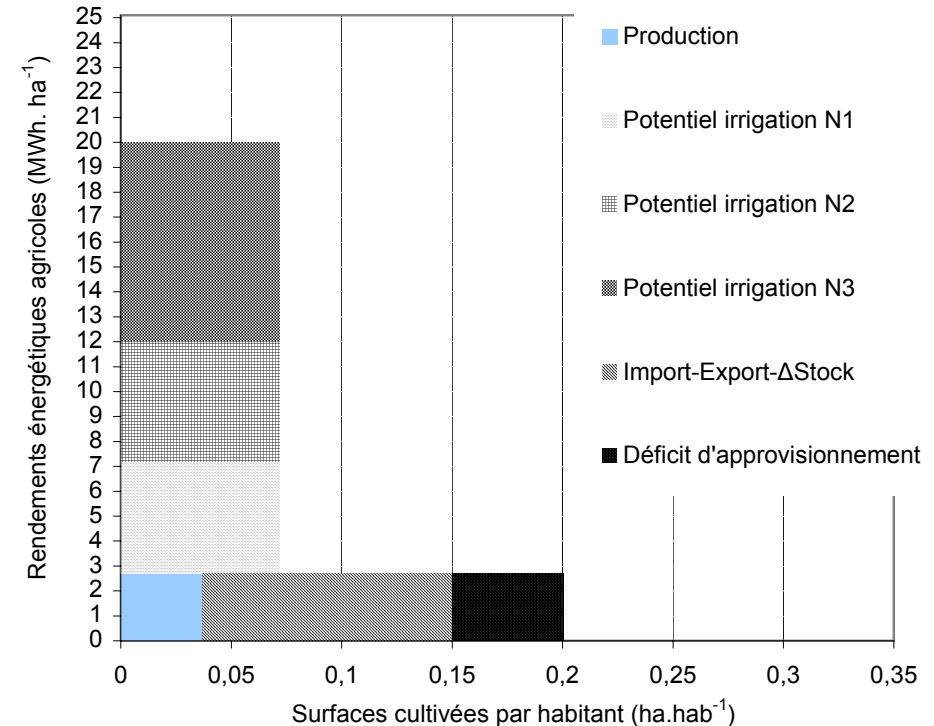
Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹. j⁻¹



1- céréales ; 2 - racines et tubercules ; 3 - sucre ; 4 - fruits ; 5 - légumineuses ; 6 - oléagineux ; 7 - huiles végétales ; 8 - légumes ; 9 - viande ; 10 - lait ; 11 - œufs ; 12 - pêche en mer ; 13 - autres

Approvisionnement en céréales et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Libye

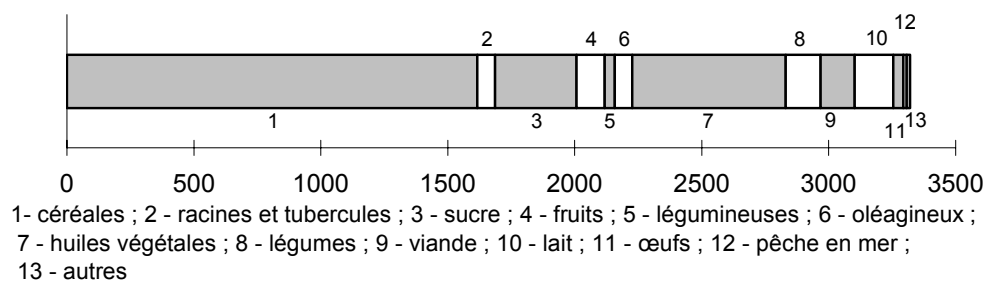
Année des données : 2002

Population	5,45	Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002)	2,0%	. an ⁻¹
DEA	3320	kcal. hab ⁻¹ . j ⁻¹
Part des céréales	48%	
Approvisionnement en céréales	2,429	Mt . an ⁻¹
Soit	1,434	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Production	0,119	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Import - ΔStock - Export	1,315	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Déficit d'approvisionnement *	0,000	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Utilisation des céréales		
Alimentation humaine	46%	
Alimentation animale	27%	
Autres usages et pertes	27%	
Agriculture (surface cultivée)	2,15	Mha
Surface cultivée	0,3949	ha . hab ⁻¹
<i>dont céréales</i>	0,063	ha . hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	1,89	MWh . ha ⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004)	0,202	MWh . ha ⁻¹
Irrigation	0,470	Mha
Surface irriguée	0,0863	ha . hab ⁻¹
Surface irrigable	0,1377	ha . hab ⁻¹
Ressources en eau	0,6	Gm ³ . an ⁻¹
Volume d'eau disponible	110	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
Volume d'eau mobilisé	884	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
<i>dont volume utilisé pour l'irrigation</i>	784	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹

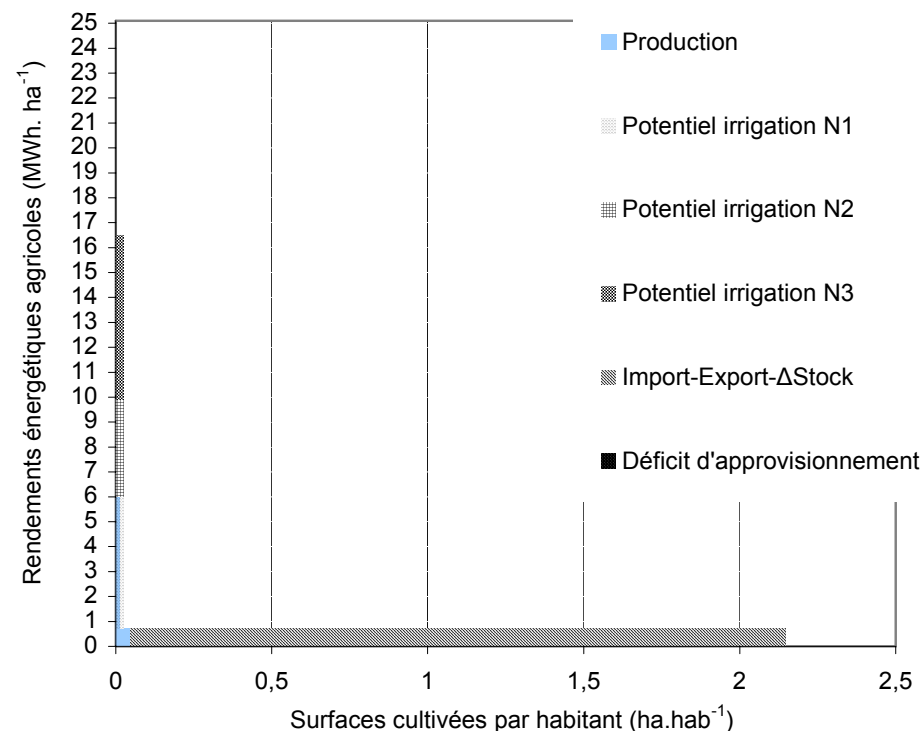
* déficit en céréales pour atteindre 48% de 2700 kcal . hab⁻¹ . j⁻¹

Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹ . j⁻¹



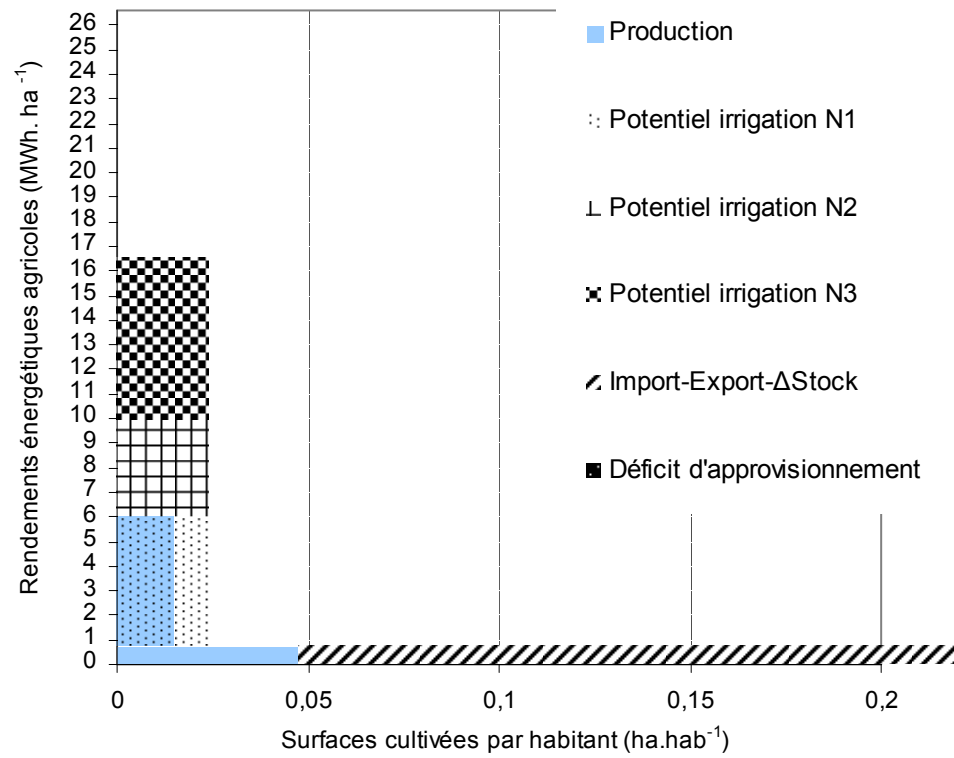
Approvisionnement en céréales et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Détail du Graphe 2 pour la Libye



FICHES PAYS

Malawi

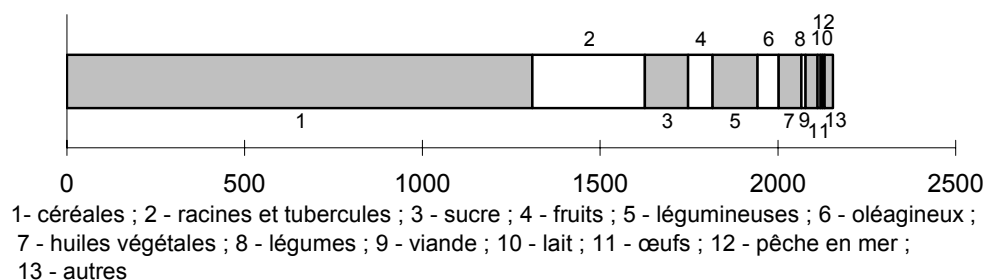
Année des données : 2002

Population	11,87	Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002)	2,1%	. an ⁻¹
DEA	2155	kcal. hab ⁻¹ . j ⁻¹
Part des céréales	61%	
Approvisionnement en céréales	2,359	Mt . an ⁻¹
Soit	0,870	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Production	0,525	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Import - ΔStock - Export	0,205	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Déficit d'approvisionnement *	0,140	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Utilisation des céréales		
Alimentation humaine	76%	
Alimentation animale	11%	
Autres usages et pertes	13%	
Agriculture (surface cultivée)	2,44	Mha
Surface cultivée	0,2055	ha . hab ⁻¹
<i>dont céréales</i>	0,138	ha . hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	3,81	MWh . ha ⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004)	1,004	MWh . ha ⁻¹
Irrigation	0,030	Mha
Surface irriguée	0,0025	ha . hab ⁻¹
Surface irrigable	0,0136	ha . hab ⁻¹
Ressources en eau	17,28	Gm ³ . an ⁻¹
Volume d'eau disponible	1456	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
Volume d'eau mobilisé	85	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
<i>dont volume utilisé pour l'irrigation</i>	68	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹

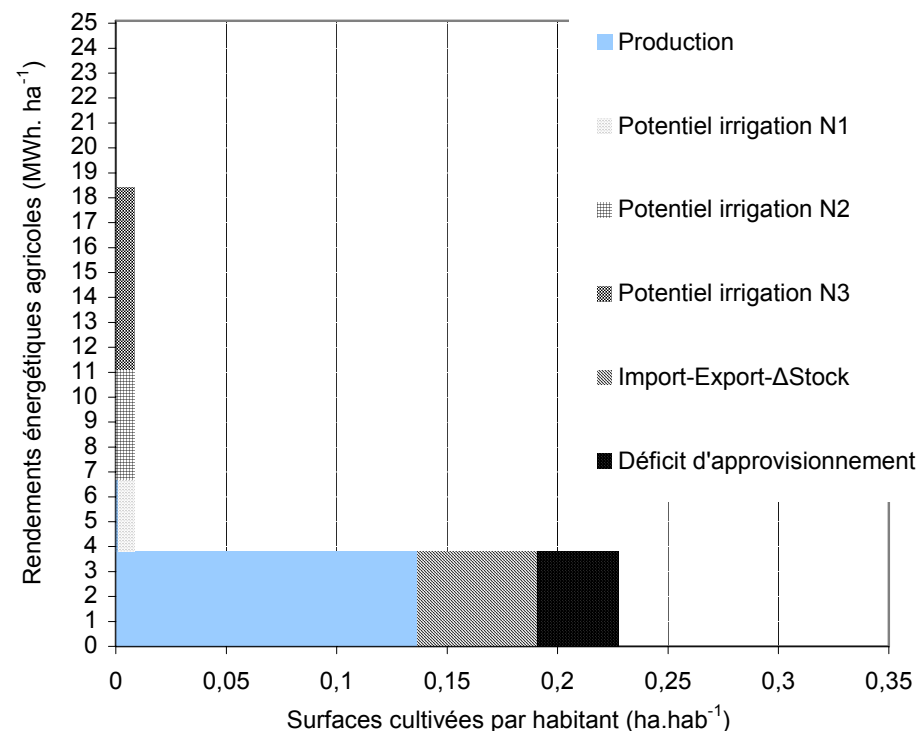
* déficit en céréales pour atteindre 61% de 2700 kcal . hab⁻¹ . j⁻¹

Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹. j⁻¹



Approvisionnement en céréales et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Mali

Année des données : 2002

Population 12,62 Mhab
 Accroissement annuel (2001 - 2002) 3,0% . an⁻¹

DEA 2174 kcal. hab⁻¹. j⁻¹
 Part des céréales 72%

Approvisionnement en céréales 2,582 Mt . an⁻¹
 Soit 0,924 MWh . hab⁻¹. an⁻¹
 Production 0,675 MWh . hab⁻¹. an⁻¹
 Import - ΔStock - Export 0,089 MWh . hab⁻¹. an⁻¹
 Déficit d'approvisionnement * 0,160 MWh . hab⁻¹. an⁻¹

Utilisation des céréales
 Alimentation humaine 88%
 Alimentation animale 0%
 Autres usages et pertes 12%

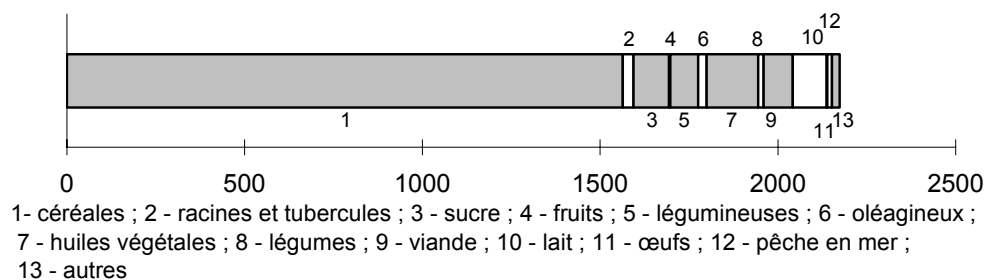
Agriculture (surface cultivée) 4,7 Mha
 Surface cultivée 0,3723 ha . hab⁻¹
 dont céréales 0,253 ha . hab⁻¹
 Rendement moyen (céréales) 2,67 MWh . ha⁻¹
 Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004) 0,569 MWh . ha⁻¹

Irrigation 0,138 Mha
 Surface irriguée 0,0109 ha . hab⁻¹
 Surface irrigable 0,0444 ha . hab⁻¹

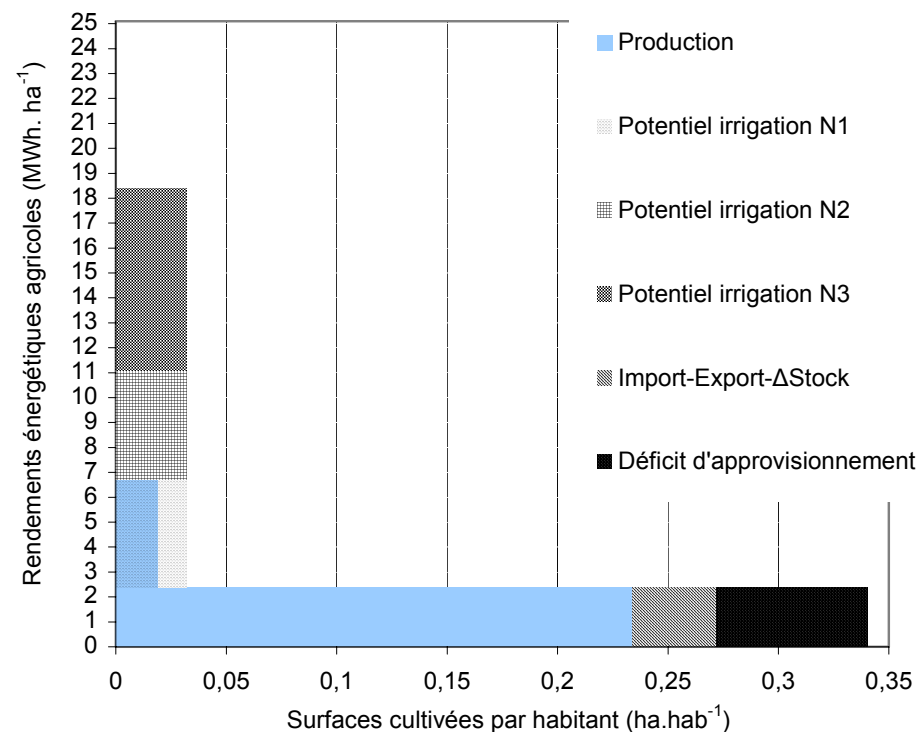
Ressources en eau 100 Gm³ . an⁻¹
 Volume d'eau disponible 7922 m³ . hab⁻¹. an⁻¹
 Volume d'eau mobilisé 549 m³ . hab⁻¹. an⁻¹
 dont volume utilisé pour l'irrigation 544 m³ . hab⁻¹. an⁻¹

* déficit en céréales pour atteindre 72% de 2700 kcal . hab⁻¹ . j⁻¹
 Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹. j⁻¹



Approvisionnement en céréales et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Mauritanie

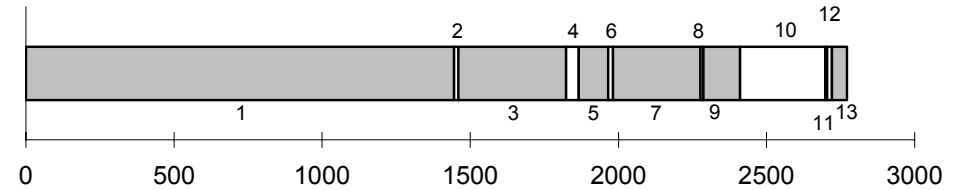
Année des données : 2002

Population	2,81	Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002)	3,0%	. an ⁻¹
DEA	2772	kcal. hab ⁻¹ . j ⁻¹
Part des céréales	52%	
Approvisionnement en céréales	0,534	Mt . an ⁻¹
Soit	0,675	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Production	0,119	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Import - ΔStock - Export	0,555	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Déficit d'approvisionnement *	0,000	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Utilisation des céréales		
Alimentation humaine	90%	
Alimentation animale	4%	
Autres usages et pertes	6%	
Agriculture (surface cultivée)	0,5	Mha
Surface cultivée	0,1781	ha . hab ⁻¹
<i>dont céréales</i>	0,040	ha . hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	3,00	MWh . ha ⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004)	0,403	MWh . ha ⁻¹
Irrigation	0,049	Mha
Surface irriguée	0,0175	ha . hab ⁻¹
Surface irrigable	0,0787	ha . hab ⁻¹
Ressources en eau	11,4	Gm ³ . an ⁻¹
Volume d'eau disponible	4061	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
Volume d'eau mobilisé	605	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
<i>dont volume utilisé pour l'irrigation</i>	534	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹

* déficit en céréales pour atteindre 52% de 2700 kcal . hab⁻¹ . j⁻¹

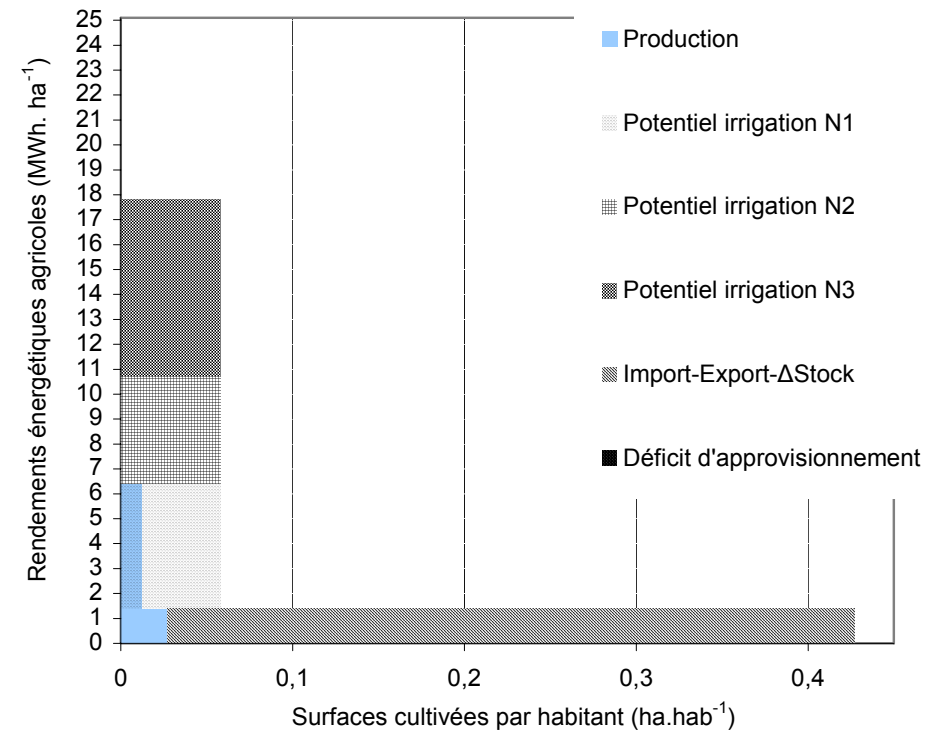
Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹ . j⁻¹



1- céréales ; 2 - racines et tubercules ; 3 - sucre ; 4 - fruits ; 5 - légumineuses ; 6 - oléagineux ; 7 - huiles végétales ; 8 - légumes ; 9 - viande ; 10 - lait ; 11 - œufs ; 12 - pêche en mer ; 13 - autres

Approvisionnement en céréales et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Maroc

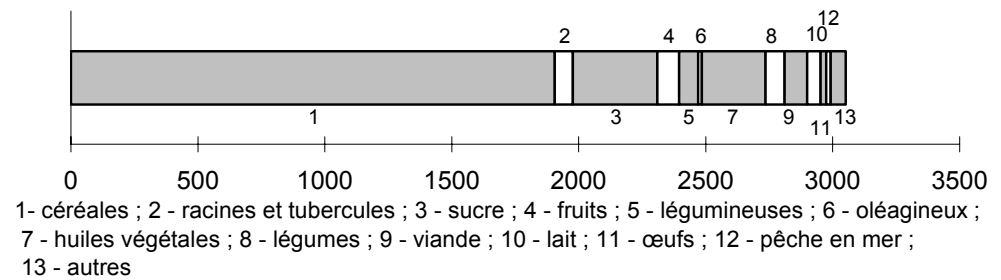
Année des données : 2002

Population	30,07	Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002)	1,6%	. an ⁻¹
DEA	3052	kcal. hab ⁻¹ . j ⁻¹
Part des céréales	62%	
Approvisionnement en céréales	9,222	Mt . an ⁻¹
Soit	0,978	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Production	0,557	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Import - ΔStock - Export	0,420	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Déficit d'approvisionnement *	0,000	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Utilisation des céréales		
Alimentation humaine	81%	
Alimentation animale	5%	
Autres usages et pertes	15%	
Agriculture (surface cultivée)	9,283	Mha
Surface cultivée	0,3087	ha . hab ⁻¹
<i>dont céréales</i>	0,165	ha . hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	3,39	MWh . ha ⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004)	1,380	MWh . ha ⁻¹
Irrigation	1,345	Mha
Surface irriguée	0,0447	ha . hab ⁻¹
Surface irrigable	0,055	ha . hab ⁻¹
Ressources en eau	29	Gm ³ . an ⁻¹
Volume d'eau disponible	964	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
Volume d'eau mobilisé	424	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
<i>dont volume utilisé pour l'irrigation</i>	382	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹

* déficit en céréales pour atteindre 62% de 2700 kcal.hab⁻¹.j⁻¹

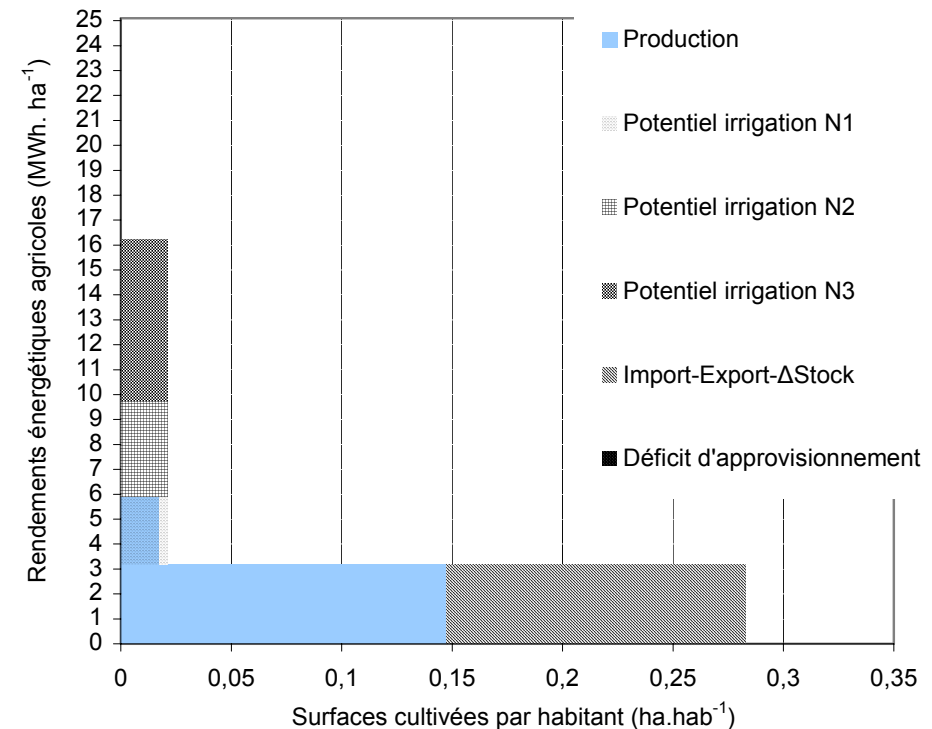
Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹. j⁻¹



Approvisionnement en céréales

et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Mozambique

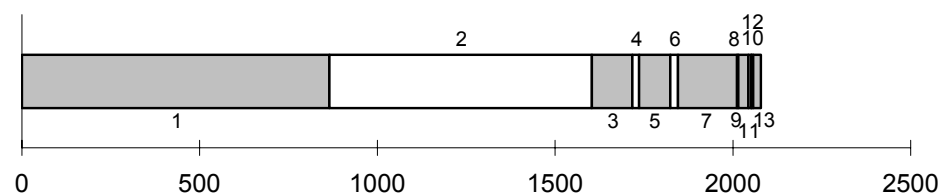
Année des données : 2002

Population	18,54	Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002)	1,8%	. an ⁻¹
DEA	2079	kcal. hab ⁻¹ . j ⁻¹
Part des céréales	41%	
Approvisionnement en céréales	2,392	Mt . an ⁻¹
Soit	0,560	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Production	0,326	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Import - ΔStock - Export	0,125	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Déficit d'approvisionnement *	0,109	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Utilisation des céréales		
Alimentation humaine	82%	
Alimentation animale	11%	
Autres usages et pertes	7%	
Agriculture (surface cultivée)	4,435	Mha
Surface cultivée	0,2393	ha . hab ⁻¹
<i>dont céréales</i>	0,111	ha . hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	2,94	MWh . ha ⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004)	0,451	MWh . ha ⁻¹
Irrigation	0,107	Mha
Surface irriguée	0,0058	ha . hab ⁻¹
Surface irrigable	0,178	ha . hab ⁻¹
Ressources en eau	216,11	Gm ³ . an ⁻¹
Volume d'eau disponible	11658	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
Volume d'eau mobilisé	34	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
<i>dont volume utilisé pour l'irrigation</i>	30	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹

* déficit en céréales pour atteindre 41% de 2700 kcal . hab⁻¹ . j⁻¹

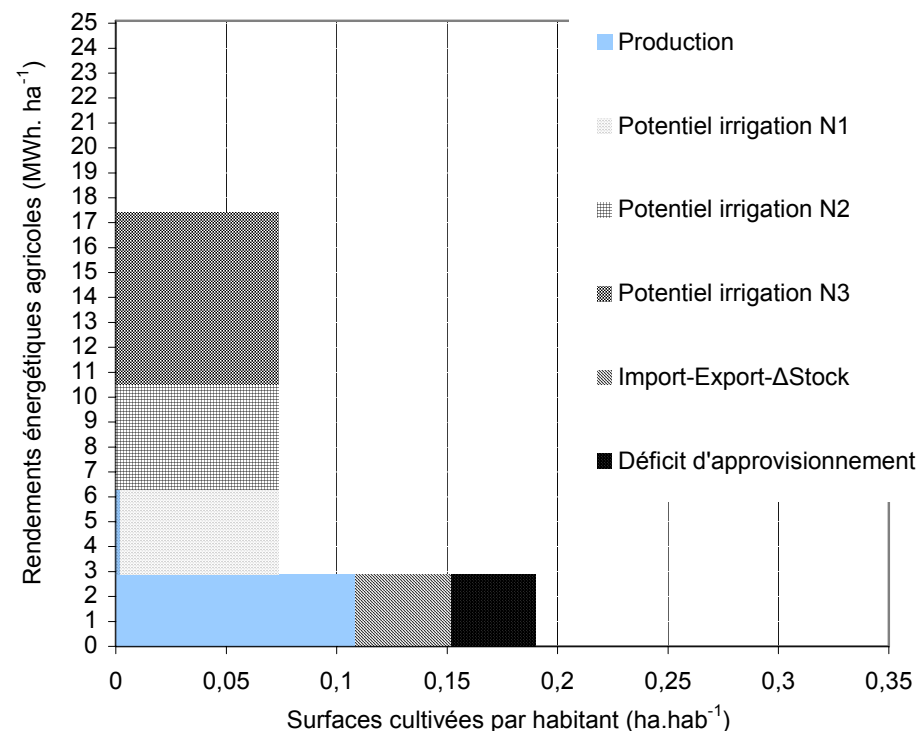
Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹ . j⁻¹



1- céréales ; 2 - racines et tubercules ; 3 - sucre ; 4 - fruits ; 5 - légumineuses ; 6 - oléagineux ; 7 - huiles végétales ; 8 - légumes ; 9 - viande ; 10 - lait ; 11 - œufs ; 12 - pêche en mer ; 13 - autres

Approvisionnement en céréales et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Namibie

Année des données : 2002

Population 1,96 Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002) 1,6% . an⁻¹

DEA 2278 kcal. hab⁻¹. j⁻¹
Part des céréales 49%

Approvisionnement en céréales 0,380 Mt . an⁻¹
Soit 0,703 MWh . hab⁻¹. an⁻¹
Production 0,181 MWh . hab⁻¹. an⁻¹
Import - ΔStock - Export 0,434 MWh . hab⁻¹. an⁻¹
Déficit d'approvisionnement * 0,088 MWh . hab⁻¹. an⁻¹

Utilisation des céréales
Alimentation humaine 71%
Alimentation animale 15%
Autres usages et pertes 14%

Agriculture (surface cultivée) 0,82 Mha
Surface cultivée 0,4182 ha . hab⁻¹
dont céréales 0,124 ha . hab⁻¹
Rendement moyen (céréales) 1,46 MWh . ha⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004) 0,326 MWh . ha⁻¹

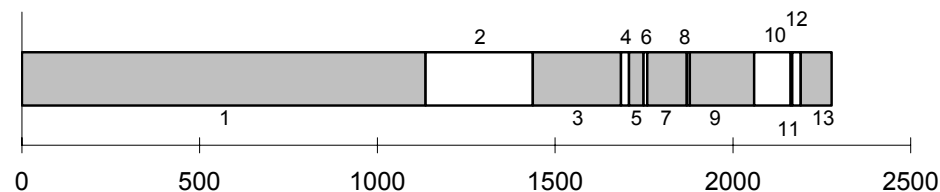
Irrigation 0,007 Mha
Surface irriguée 0,0036 ha . hab⁻¹
Surface irrigable 0,0229 ha . hab⁻¹

Ressources en eau 17,94 Gm³ . an⁻¹
Volume d'eau disponible 9148 m³ . hab⁻¹. an⁻¹
Volume d'eau mobilisé 137 m³ . hab⁻¹. an⁻¹
dont volume utilisé pour l'irrigation 86 m³ . hab⁻¹. an⁻¹

* déficit en céréales pour atteindre 49% de 2700 kcal . hab⁻¹ . j⁻¹

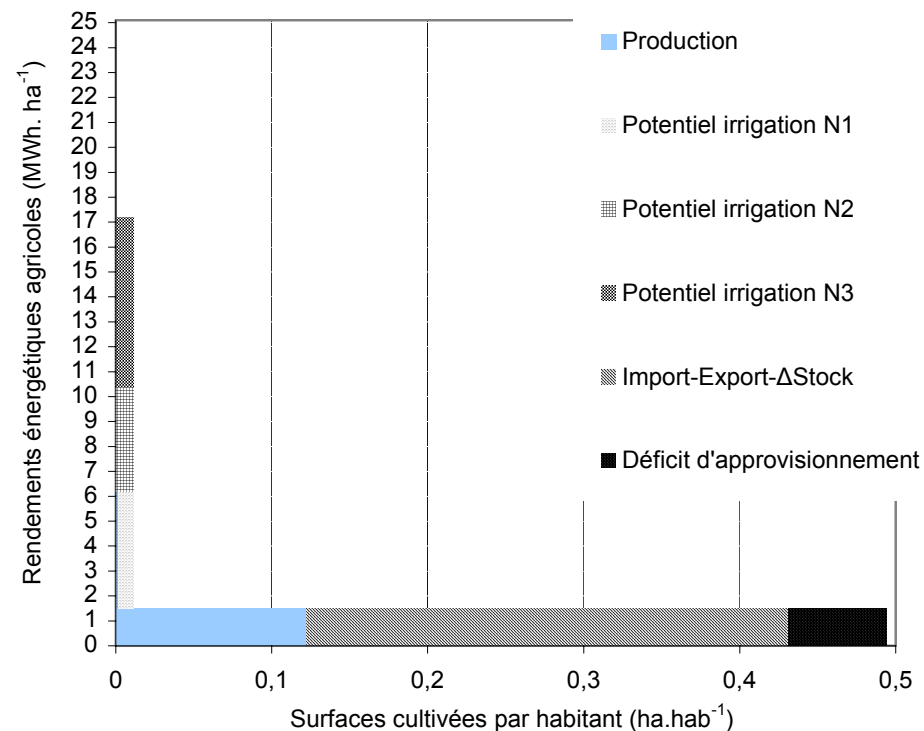
Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹. j⁻¹



1- céréales ; 2 - racines et tubercules ; 3 - sucre ; 4 - fruits ; 5 - légumineuses ; 6 - oléagineux ; 7 - huiles végétales ; 8 - légumes ; 9 - viande ; 10 - lait ; 11 - œufs ; 12 - pêche en mer ; 13 - autres

Approvisionnement en céréales et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Niger

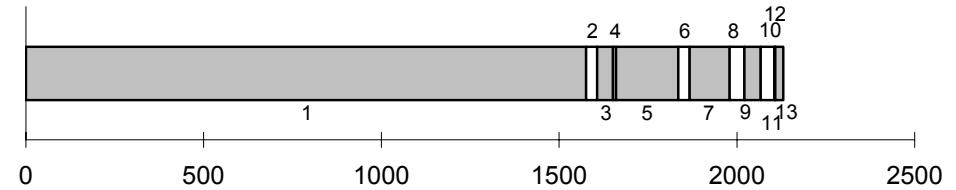
Année des données : 2002

Population	11,54	Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002)	3,7%	. an ⁻¹
DEA	2130	kcal. hab ⁻¹ . j ⁻¹
Part des céréales	74%	
Approvisionnement en céréales	3,378	Mt . an ⁻¹
Soit	1,026	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Production	0,814	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Import - ΔStock - Export	0,034	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Déficit d'approvisionnement *	0,178	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Utilisation des céréales		
Alimentation humaine	78%	
Alimentation animale	4%	
Autres usages et pertes	19%	
Agriculture (surface cultivée)	4,5	Mha
Surface cultivée	0,3898	ha . hab ⁻¹
dont céréales	0,688	ha . hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	1,18	MWh . ha ⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004)	0,166	MWh . ha ⁻¹
Irrigation	0,066	Mha
Surface irriguée	0,0057	ha . hab ⁻¹
Surface irrigable	0,0234	ha . hab ⁻¹
Ressources en eau	33,65	Gm ³ . an ⁻¹
Volume d'eau disponible	2915	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
Volume d'eau mobilisé	189	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
dont volume utilisé pour l'irrigation	180	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹

* déficit en céréales pour atteindre 74% de 2700 kcal . hab⁻¹ . j⁻¹

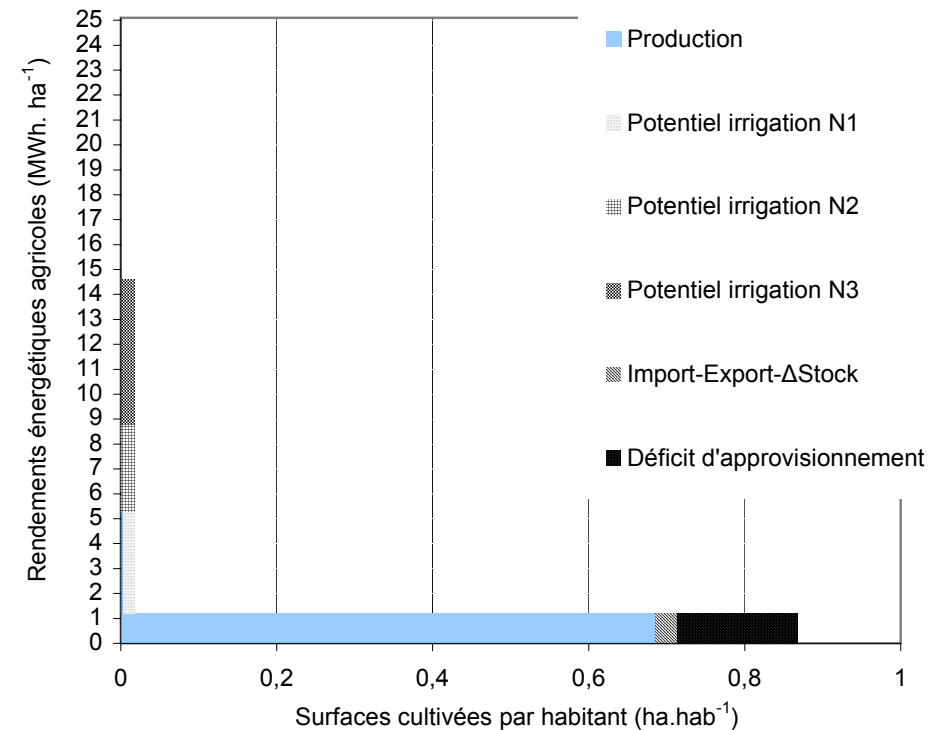
Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹. j⁻¹



1- céréales ; 2 - racines et tubercules ; 3 - sucre ; 4 - fruits ; 5 - légumineuses ; 6 - oléagineux ; 7 - huiles végétales ; 8 - légumes ; 9 - viande ; 10 - lait ; 11 - œufs ; 12 - pêche en mer ; 13 - autres

Approvisionnement en céréales et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Nigéria

Année des données : 2002

Population 120,91 Mhab
 Accroissement annuel (2001 - 2002) 2,6% . an⁻¹

DEA 2726 kcal. hab⁻¹. j⁻¹
 Part des céréales 45%

Approvisionnement en céréales 24,745 Mt . an⁻¹
 Soit 0,735 MWh . hab⁻¹ . an⁻¹
 Production 0,630 MWh . hab⁻¹ . an⁻¹
 Import - ΔStock - Export 0,105 MWh . hab⁻¹ . an⁻¹
 Déficit d'approvisionnement * 0,000 MWh . hab⁻¹ . an⁻¹

Utilisation des céréales
 Alimentation humaine 72%
 Alimentation animale 7%
 Autres usages et pertes 21%

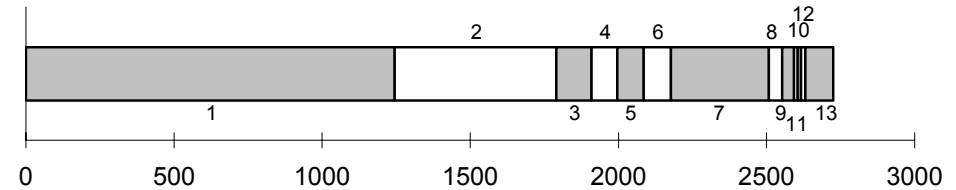
Agriculture (surface cultivée) 33 Mha
 Surface cultivée 0,2729 ha . hab⁻¹
 dont céréales 0,174 ha . hab⁻¹
 Rendement moyen (céréales) 3,62 MWh . ha⁻¹
 Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004) 0,252 MWh . ha⁻¹

Irrigation 0,233 Mha
 Surface irriguée 0,0019 ha . hab⁻¹
 Surface irrigable 0,0259 ha . hab⁻¹

Ressources en eau 286,2 Gm³ . an⁻¹
 Volume d'eau disponible 2367 m³ . hab⁻¹ . an⁻¹
 Volume d'eau mobilisé 66 m³ . hab⁻¹ . an⁻¹
 dont volume utilisé pour l'irrigation 46 m³ . hab⁻¹ . an⁻¹

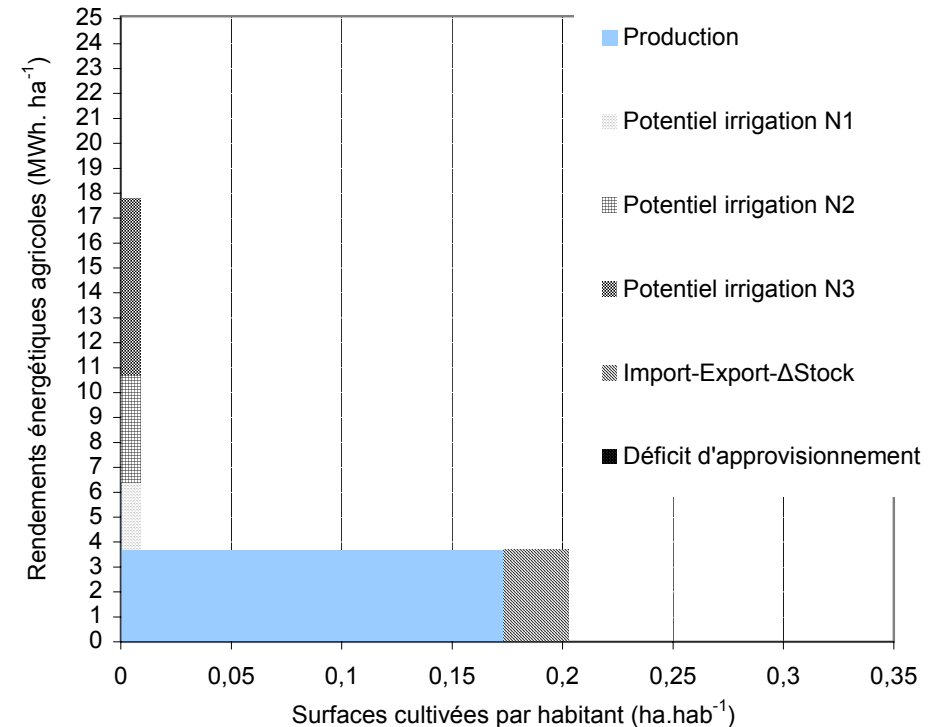
* déficit en céréales pour atteindre 45% de 2700 kcal . hab⁻¹ . j⁻¹
 Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹ . j⁻¹



1- céréales ; 2 - racines et tubercules ; 3 - sucre ; 4 - fruits ; 5 - légumineuses ; 6 - oléagineux ;
 7 - huiles végétales ; 8 - légumes ; 9 - viande ; 10 - lait ; 11 - œufs ; 12 - pêche en mer ;
 13 - autres

Approvisionnement en céréales et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Ouganda

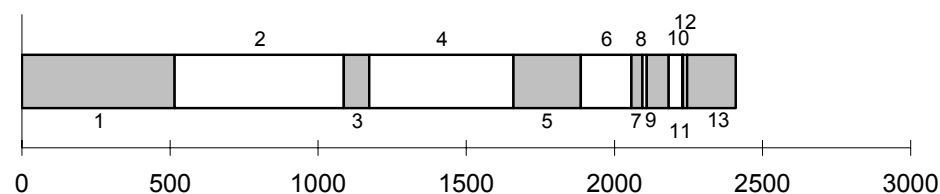
Année des données : 2002

Population	25,00	Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002)	3,2%	. an ⁻¹
DEA	2410	kcal. hab ⁻¹ . j ⁻¹
Part des céréales	21%	
Approvisionnement en céréales	2,509	Mt. an ⁻¹
Soit	0,376	MWh. hab ⁻¹ .an ⁻¹
Production	0,327	MWh. hab ⁻¹ .an ⁻¹
Import - ΔStock - Export	0,023	MWh. hab ⁻¹ .an ⁻¹
Déficit d'approvisionnement *	0,026	MWh. hab ⁻¹ .an ⁻¹
Utilisation des céréales		
Alimentation humaine	62%	
Alimentation animale	9%	
Autres usages et pertes	29%	
Agriculture (surface cultivée)	7,2	Mha
Surface cultivée	0,288	ha. hab ⁻¹
<i>dont céréales</i>	0,057	ha. hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	5,77	MWh. ha ⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004)	0,576	MWh. ha ⁻¹
Irrigation	0,009	Mha
Surface irriguée	0,0004	ha. hab ⁻¹
Surface irrigable	0,0081	ha. hab ⁻¹
Ressources en eau	66	Gm ³ . an ⁻¹
Volume d'eau disponible	2640	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
Volume d'eau mobilisé	12	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
<i>dont volume utilisé pour l'irrigation</i>	5	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹

* déficit en céréales pour atteindre 21% de 2700 kcal. hab⁻¹. j⁻¹

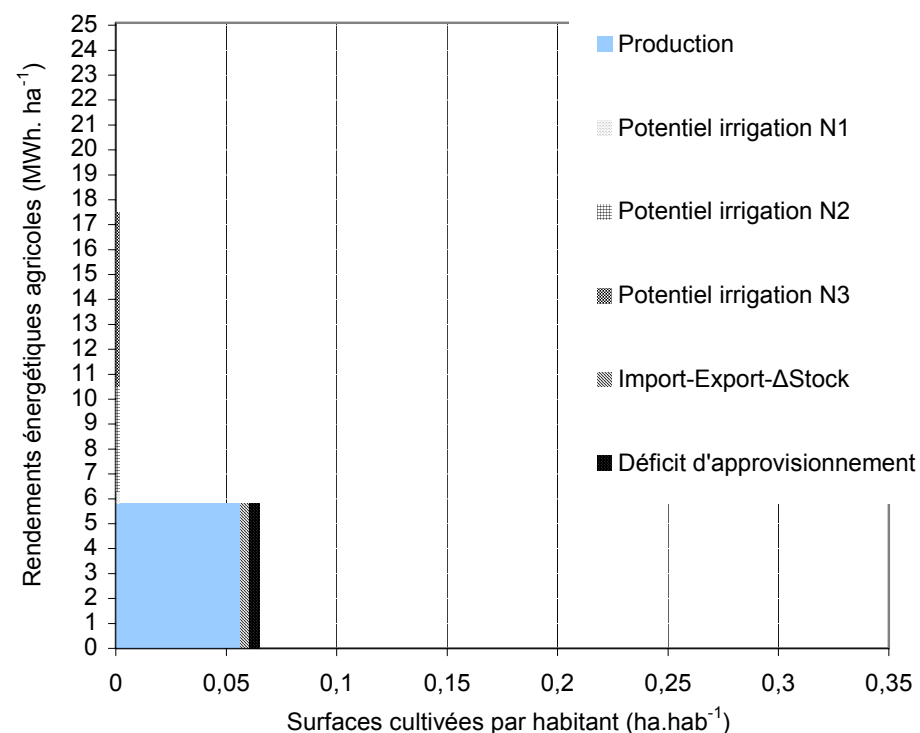
Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹. j⁻¹



1- céréales ; 2 - racines et tubercules ; 3 - sucre ; 4 - fruits ; 5 - légumineuses ; 6 - oléagineux ; 7 - huiles végétales ; 8 - légumes ; 9 - viande ; 10 - lait ; 11 - œufs ; 12 - pêche en mer ; 13 - autres

Approvisionnement en céréales et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Rwanda

Année des données : 2002

Population	8,27	Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002)	2,6%	. an ⁻¹
DEA	2084	kcal. hab ⁻¹ . j ⁻¹
Part des céréales	14%	
Approvisionnement en céréales	0,351	Mt . an ⁻¹
Soit	0,193	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Production	0,141	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Import - ΔStock - Export	0,015	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Déficit d'approvisionnement *	0,037	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹

Utilisation des céréales

Alimentation humaine	80%
Alimentation animale	0%
Autres usages et pertes	20%

Agriculture (surface cultivée)

Surface cultivée	1,385	Mha
	0,1674	ha . hab ⁻¹
<i>dont céréales</i>	0,036	ha . hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	3,90	MWh . ha ⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004)	0,484	MWh . ha ⁻¹

Irrigation

Surface irriguée	0,006	Mha
	0,0007	ha . hab ⁻¹
Surface irrigable	0,0193	ha . hab ⁻¹

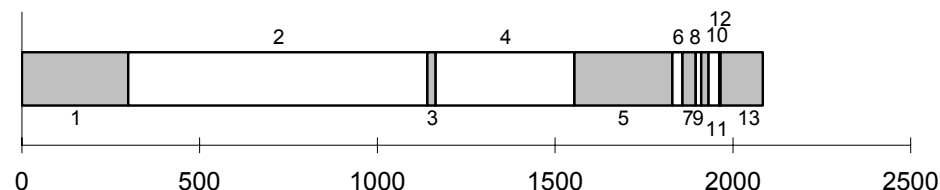
Ressources en eau

Volume d'eau disponible	5,2	Gm ³ . an ⁻¹
	629	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
Volume d'eau mobilisé	9	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
<i>dont volume utilisé pour l'irrigation</i>	4	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹

* déficit en céréales pour atteindre 14% de 2700 kcal.hab⁻¹.j⁻¹

Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

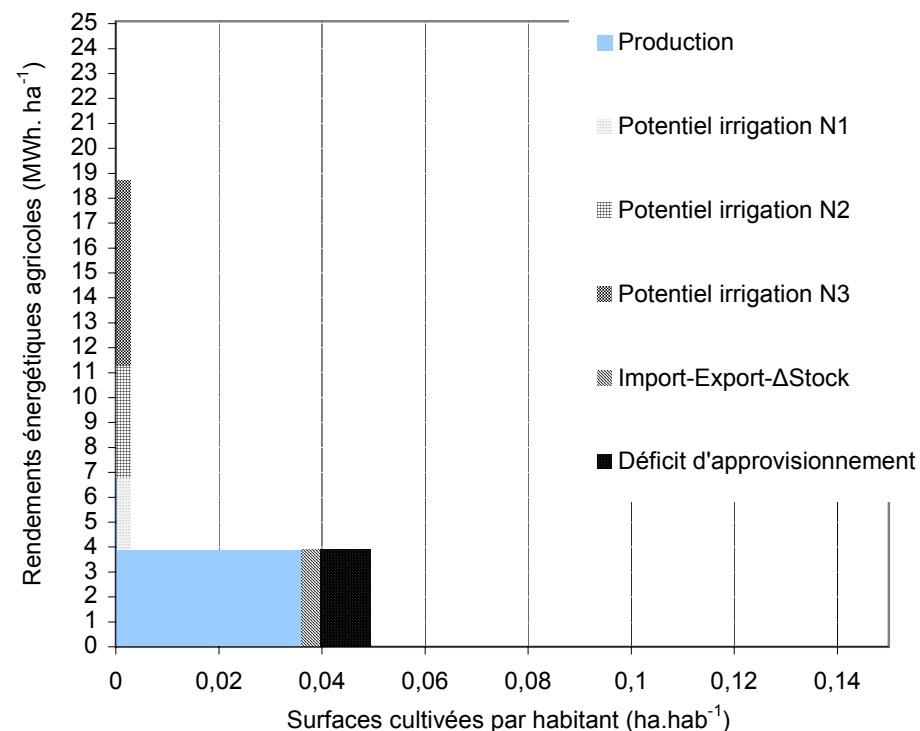
Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹.j⁻¹



1- céréales ; 2 - racines et tubercules ; 3 - sucre ; 4 - fruits ; 5 - légumineuses ; 6 - oléagineux ; 7 - huiles végétales ; 8 - légumes ; 9 - viande ; 10 - lait ; 11 - œufs ; 12 - pêche en mer ; 13 - autres

Approvisionnement en céréales

et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Sénégal

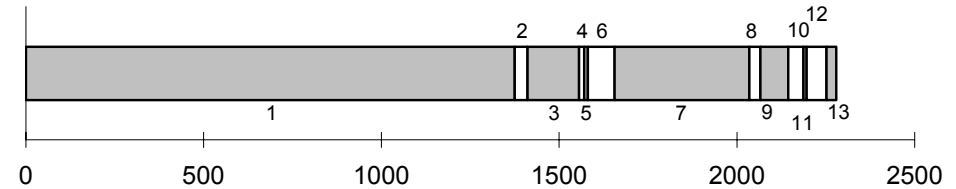
Année des données : 2002

Population	9,86	Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002)	2,4%	. an ⁻¹
DEA	2280	kcal. hab ⁻¹ . j ⁻¹
Part des céréales	60%	
Approvisionnement en céréales	1,988	Mt . an ⁻¹
Soit	0,830	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Production	0,259	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Import - ΔStock - Export	0,463	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Déficit d'approvisionnement *	0,107	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Utilisation des céréales		
Alimentation humaine	80%	
Alimentation animale	1%	
Autres usages et pertes	19%	
Agriculture (surface cultivée)	2,5	Mha
Surface cultivée	0,2537	ha . hab ⁻¹
<i>dont céréales</i>	0,122	ha . hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	2,12	MWh . ha ⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004)	0,545	MWh . ha ⁻¹
Irrigation	0,071	Mha
Surface irriguée	0,0072	ha . hab ⁻¹
Surface irrigable	0,0406	ha . hab ⁻¹
Ressources en eau	39,4	Gm ³ . an ⁻¹
Volume d'eau disponible	3998	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
Volume d'eau mobilisé	161	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
<i>dont volume utilisé pour l'irrigation</i>	146	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹

* déficit en céréales pour atteindre 60% de 2700 kcal . hab⁻¹ . j⁻¹

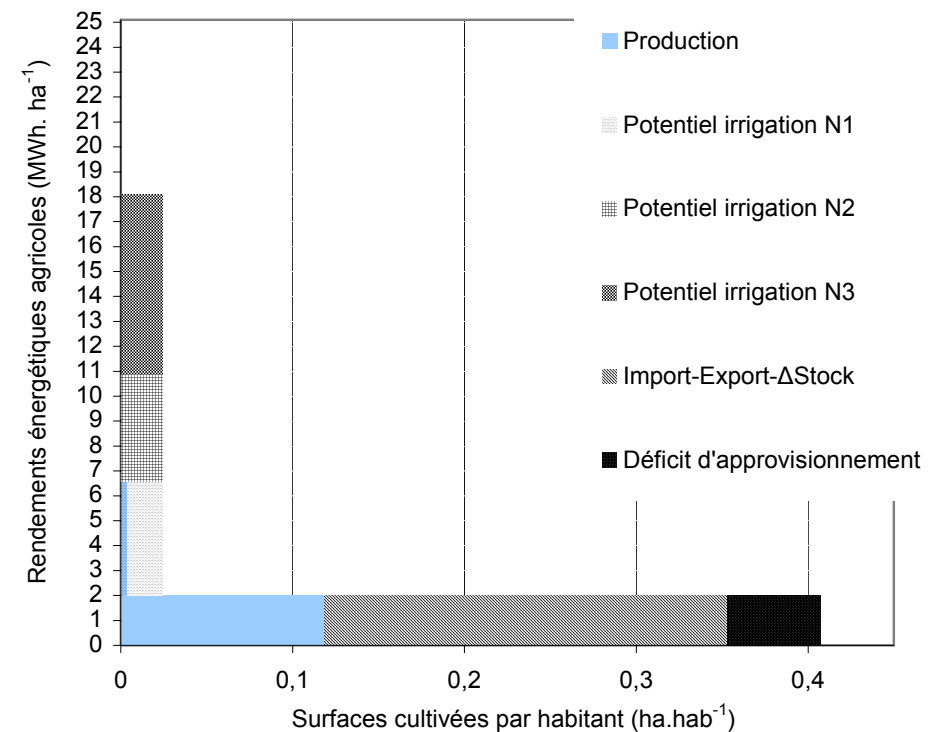
Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹ . j⁻¹



1- céréales ; 2 - racines et tubercules ; 3 - sucre ; 4 - fruits ; 5 - légumineuses ; 6 - oléagineux ; 7 - huiles végétales ; 8 - légumes ; 9 - viande ; 10 - lait ; 11 - œufs ; 12 - pêche en mer ; 13 - autres

Approvisionnement en céréales et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Sierra Leone

Année des données : 2002

Population 4,76 Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002) 4,2% . an⁻¹

DEA 1936 kcal. hab⁻¹. j⁻¹
Part des céréales 52%

Approvisionnement en céréales 0,559 Mt . an⁻¹
Soit 0,632 MWh . hab⁻¹. an⁻¹
Production 0,179 MWh . hab⁻¹. an⁻¹
Import - ΔStock - Export 0,285 MWh . hab⁻¹. an⁻¹
Déficit d'approvisionnement * 0,167 MWh . hab⁻¹. an⁻¹

Utilisation des céréales
Alimentation humaine 92%
Alimentation animale 0%
Autres usages et pertes 8%

Agriculture (surface cultivée) 0,6 Mha
Surface cultivée 0,1259 ha . hab⁻¹
dont céréales 0,052 ha . hab⁻¹
Rendement moyen (céréales) 3,45 MWh . ha⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004) 0,212 MWh . ha⁻¹

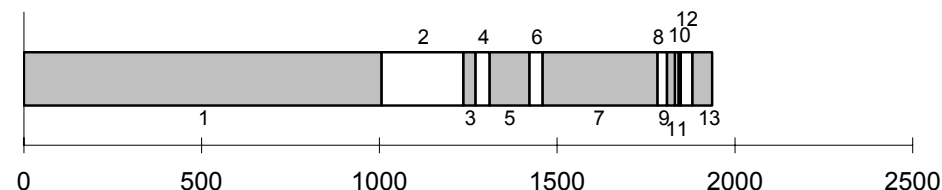
Irrigation 0,030 Mha
Surface irriguée 0,0063 ha . hab⁻¹
Surface irrigable 0,1694 ha . hab⁻¹

Ressources en eau 160 Gm³ . an⁻¹
Volume d'eau disponible 33585 m³ . hab⁻¹. an⁻¹
Volume d'eau mobilisé 80 m³ . hab⁻¹. an⁻¹
dont volume utilisé pour l'irrigation 74 m³ . hab⁻¹. an⁻¹

* déficit en céréales pour atteindre 52% de 2700 kcal.hab⁻¹. j⁻¹

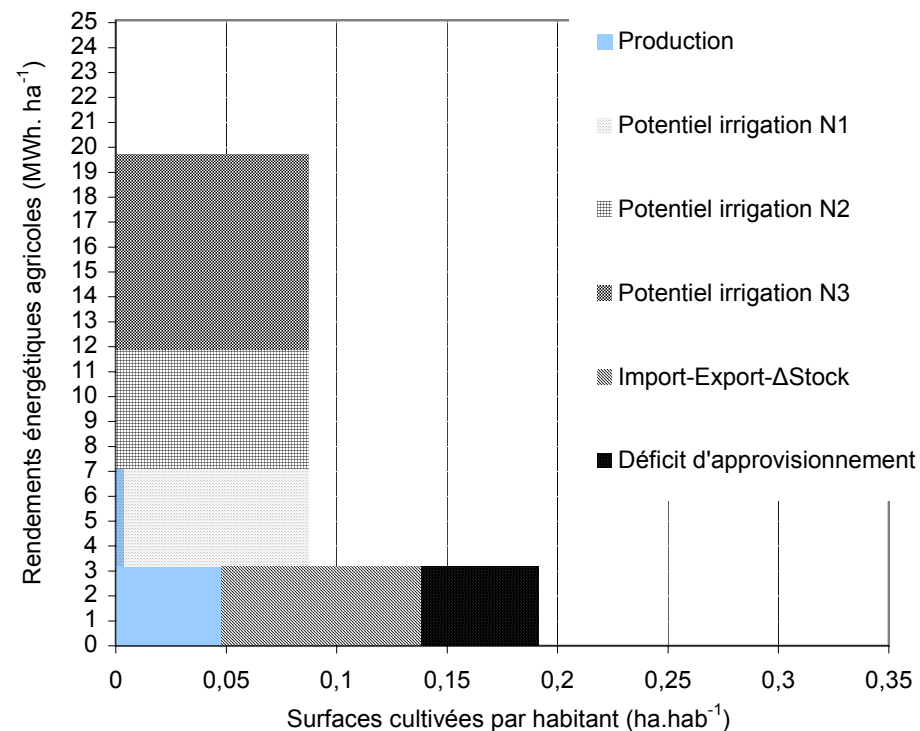
Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹. j⁻¹



1- céréales ; 2 - racines et tubercules ; 3 - sucre ; 4 - fruits ; 5 - légumineuses ; 6 - oléagineux ; 7 - huiles végétales ; 8 - légumes ; 9 - viande ; 10 - lait ; 11 - œufs ; 12 - pêche en mer ; 13 - autres

Approvisionnement en céréales et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Soudan

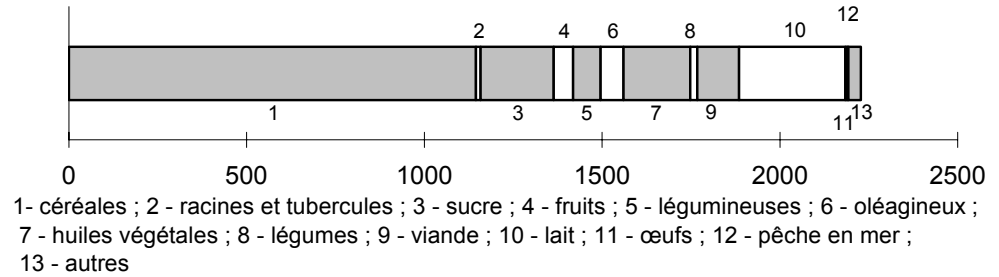
Année des données : 2002

Population	32,88	Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002)	2,3%	. an ⁻¹
DEA	2228	kcal. hab ⁻¹ . j ⁻¹
Part des céréales	51%	
Approvisionnement en céréales	5,000	Mt . an ⁻¹
Soit	0,655	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Production	0,413	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Import - ΔStock - Export	0,140	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Déficit d'approvisionnement *	0,102	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Utilisation des céréales		
Alimentation humaine	87%	
Alimentation animale	5%	
Autres usages et pertes	8%	
Agriculture (surface cultivée)	16,653	Mha
Surface cultivée	0,5065	ha . hab ⁻¹
<i>dont céréales</i>	0,232	ha . hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	1,78	MWh . ha ⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004)	0,325	MWh . ha ⁻¹
Irrigation	1,950	Mha
Surface irriguée	0,0593	ha . hab ⁻¹
Surface irrigable	0,0847	ha . hab ⁻¹
Ressources en eau	64,5	Gm ³ . an ⁻¹
Volume d'eau disponible	1962	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
Volume d'eau mobilisé	1135	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
<i>dont volume utilisé pour l'irrigation</i>	1097	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹

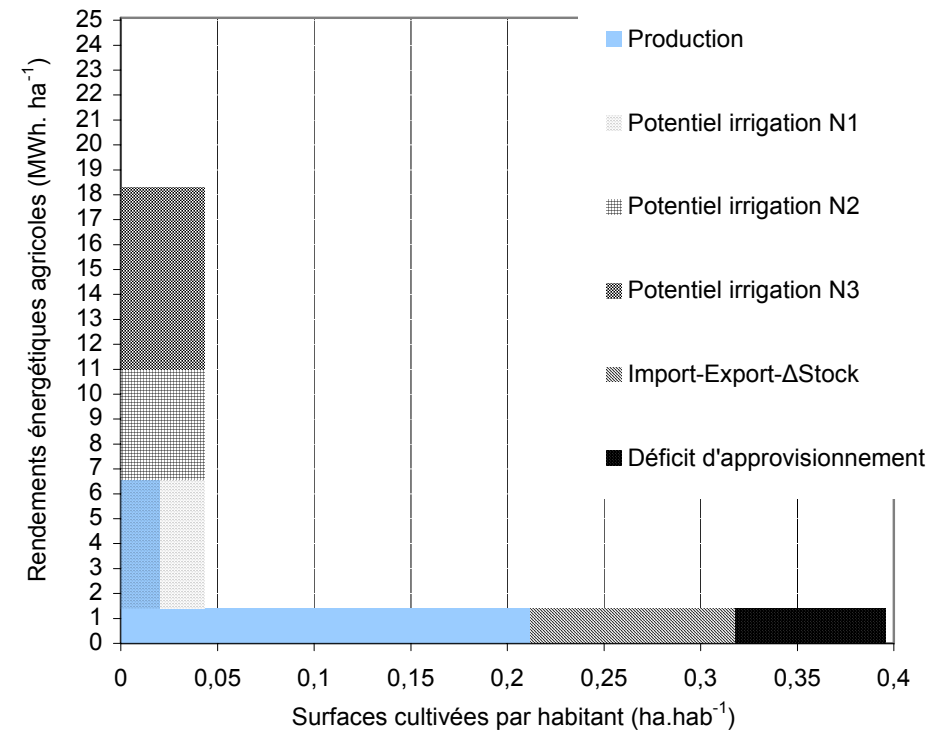
* déficit en céréales pour atteindre 51% de 2700 kcal . hab⁻¹ . j⁻¹

Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹ . j⁻¹



Approvisionnement en céréales et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Souaziland

Année des données : 2002

Population	1,07	Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002)	1,0%	. an ⁻¹
DEA	2322	kcal. hab ⁻¹ . j ⁻¹
Part des céréales	44%	
Approvisionnement en céréales	0,273	Mt . an ⁻¹
Soit	1,002	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Production	0,281	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Import - ΔStock - Export	0,650	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Déficit d'approvisionnement *	0,071	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹

Utilisation des céréales

Alimentation humaine	45%
Alimentation animale	12%
Autres usages et pertes	43%

Agriculture (surface cultivée)

Surface cultivée	0,19	Mha
dont céréales	0,1777	ha . hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	0,071	ha . hab ⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004)	3,97	MWh . ha ⁻¹
	1,541	MWh . ha ⁻¹

Irrigation

Surface irriguée	0,070	Mha
Surface irrigable	0,0655	ha . hab ⁻¹
	0,0842	ha . hab ⁻¹

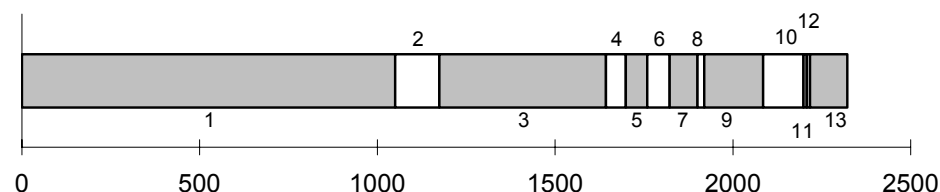
Ressources en eau

Volume d'eau disponible	4,51	Gm ³ . an ⁻¹
Volume d'eau mobilisé	4219	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
dont volume utilisé pour l'irrigation	777	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
	711	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹

* déficit en céréales pour atteindre 44% de 2700 kcal.hab⁻¹.j⁻¹

Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

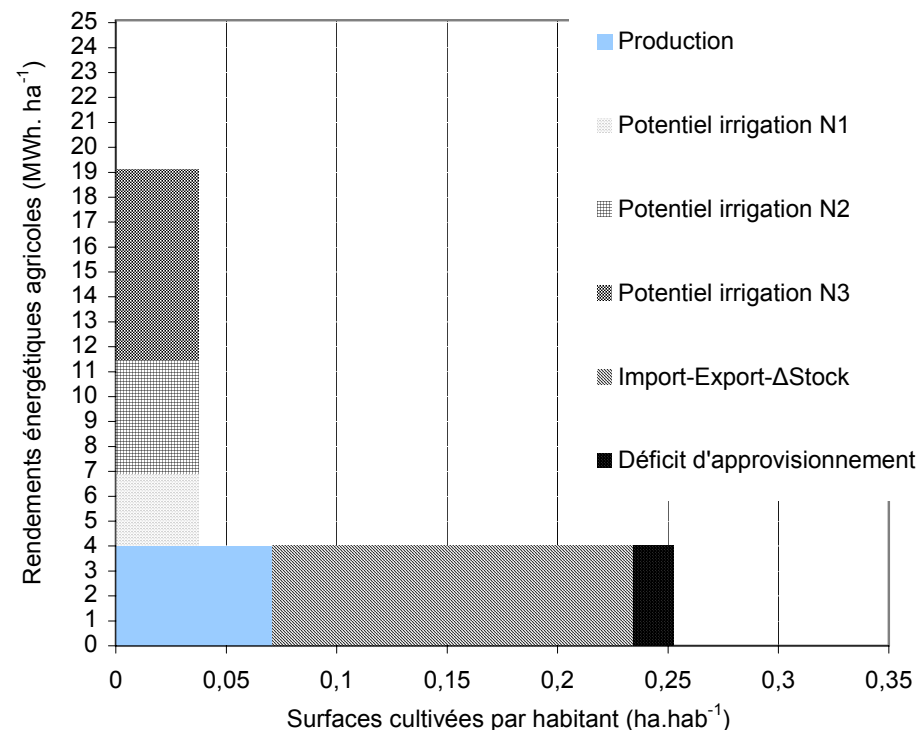
Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹. j⁻¹



1- céréales ; 2 - racines et tubercules ; 3 - sucre ; 4 - fruits ; 5 - légumineuses ; 6 - oléagineux ; 7 - huiles végétales ; 8 - légumes ; 9 - viande ; 10 - lait ; 11 - œufs ; 12 - pêche en mer ; 13 - autres

Approvisionnement en céréales

et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Tanzanie

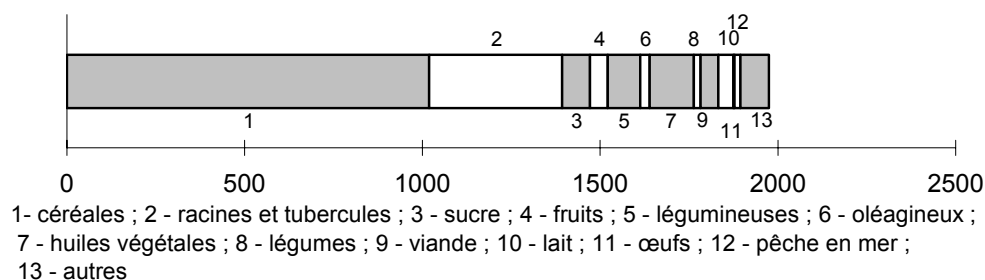
Année des données : 2002

Population	36,28	Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002)	2,0%	. an ⁻¹
DEA	1975	kcal. hab ⁻¹ . j ⁻¹
Part des céréales	51%	
Approvisionnement en céréales	5,134	Mt . an ⁻¹
Soit	0,693	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Production	0,458	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Import - ΔStock - Export	0,077	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Déficit d'approvisionnement *	0,158	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Utilisation des céréales		
Alimentation humaine	81%	
Alimentation animale	3%	
Autres usages et pertes	17%	
Agriculture (surface cultivée)	5,1	Mha
Surface cultivée	0,1406	ha . hab ⁻¹
<i>dont céréales</i>	0,080	ha . hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	5,70	MWh . ha ⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004)	0,584	MWh . ha ⁻¹
Irrigation	0,170	Mha
Surface irriguée	0,0047	ha . hab ⁻¹
Surface irrigable	0,0228	ha . hab ⁻¹
Ressources en eau	91	Gm ³ . an ⁻¹
Volume d'eau disponible	2509	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
Volume d'eau mobilisé	55	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
<i>dont volume utilisé pour l'irrigation</i>	51	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹

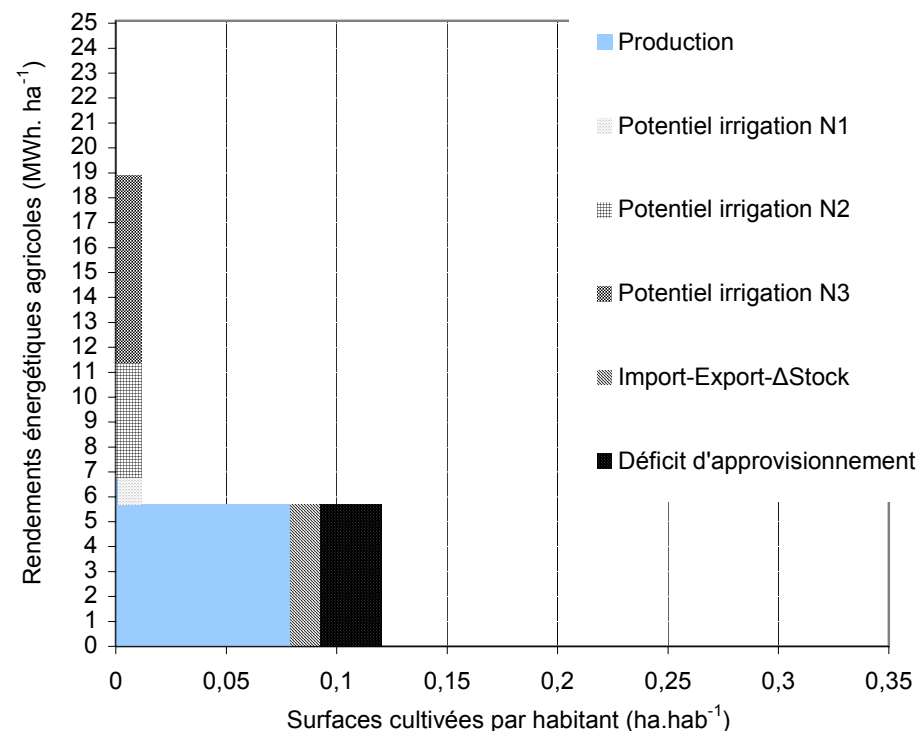
* déficit en céréales pour atteindre 51% de 2700 kcal . hab⁻¹ . j⁻¹

Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹. j⁻¹



Approvisionnement en céréales et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Tchad

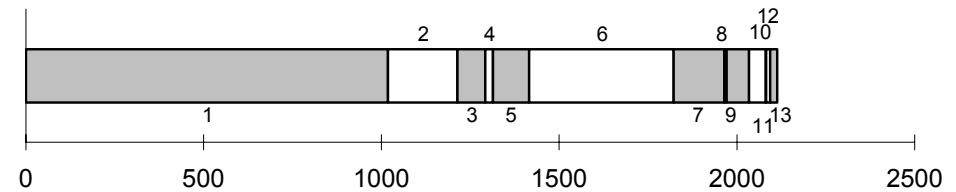
Année des données : 2002

Population	8,35	Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002)	3,0%	. an ⁻¹
DEA	2114	kcal. hab ⁻¹ . j ⁻¹
Part des céréales	48%	
Approvisionnement en céréales	1,240	Mt . an ⁻¹
Soit	0,633	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Production	0,485	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Import - ΔStock - Export	0,028	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Déficit d'approvisionnement *	0,120	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Utilisation des céréales		
Alimentation humaine	84%	
Alimentation animale	2%	
Autres usages et pertes	14%	
Agriculture (surface cultivée)	3,63	Mha
Surface cultivée	0,4348	ha . hab ⁻¹
dont céréales	0,216	ha . hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	2,24	MWh . ha ⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004)	0,248	MWh . ha ⁻¹
Irrigation	0,020	Mha
Surface irriguée	0,0024	ha . hab ⁻¹
Surface irrigable	0,112	ha . hab ⁻¹
Ressources en eau	43	Gm ³ . an ⁻¹
Volume d'eau disponible	5151	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
Volume d'eau mobilisé	28	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
dont volume utilisé pour l'irrigation	22	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹

* déficit en céréales pour atteindre 48% de 2700 kcal.hab⁻¹.j⁻¹

Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

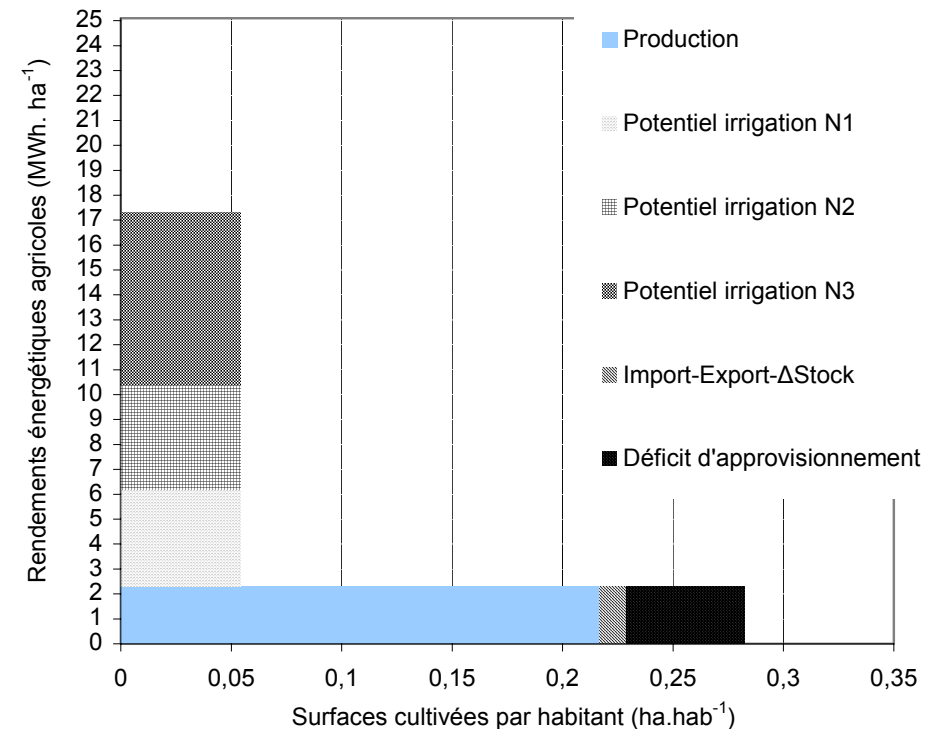
Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹. j⁻¹



1- céréales ; 2 - racines et tubercules ; 3 - sucre ; 4 - fruits ; 5 - légumineuses ; 6 - oléagineux ; 7 - huiles végétales ; 8 - légumes ; 9 - viande ; 10 - lait ; 11 - œufs ; 12 - pêche en mer ; 13 - autres

Approvisionnement en céréales

et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Togo

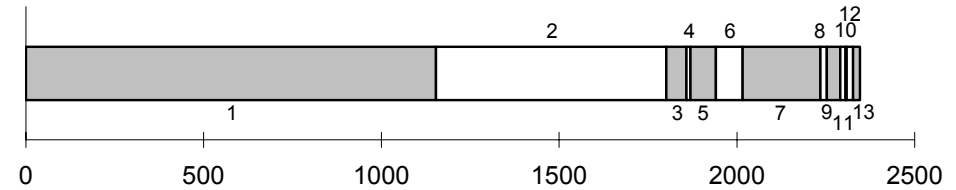
Année des données : 2002

Population	4,80	Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002)	2,5%	. an ⁻¹
DEA	2345	kcal. hab ⁻¹ . j ⁻¹
Part des céréales	49%	
Approvisionnement en céréales	0,952	Mt . an ⁻¹
Soit	0,767	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Production	0,572	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Import - ΔStock - Export	0,122	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Déficit d'approvisionnement *	0,074	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Utilisation des céréales		
Alimentation humaine	70%	
Alimentation animale	4%	
Autres usages et pertes	27%	
Agriculture (surface cultivée)	2,63	Mha
Surface cultivée	0,5478	ha . hab ⁻¹
<i>dont céréales</i>	0,167	ha . hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	3,43	MWh . ha ⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004)	0,401	MWh . ha ⁻¹
Irrigation	0,018	Mha
Surface irriguée	0,0037	ha . hab ⁻¹
Surface irrigable	0,0375	ha . hab ⁻¹
Ressources en eau	14,7	Gm ³ . an ⁻¹
Volume d'eau disponible	3062	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
Volume d'eau mobilisé	35	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
<i>dont volume utilisé pour l'irrigation</i>	16	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹

* déficit en céréales pour atteindre 49% de 2700 kcal . hab⁻¹ . j⁻¹

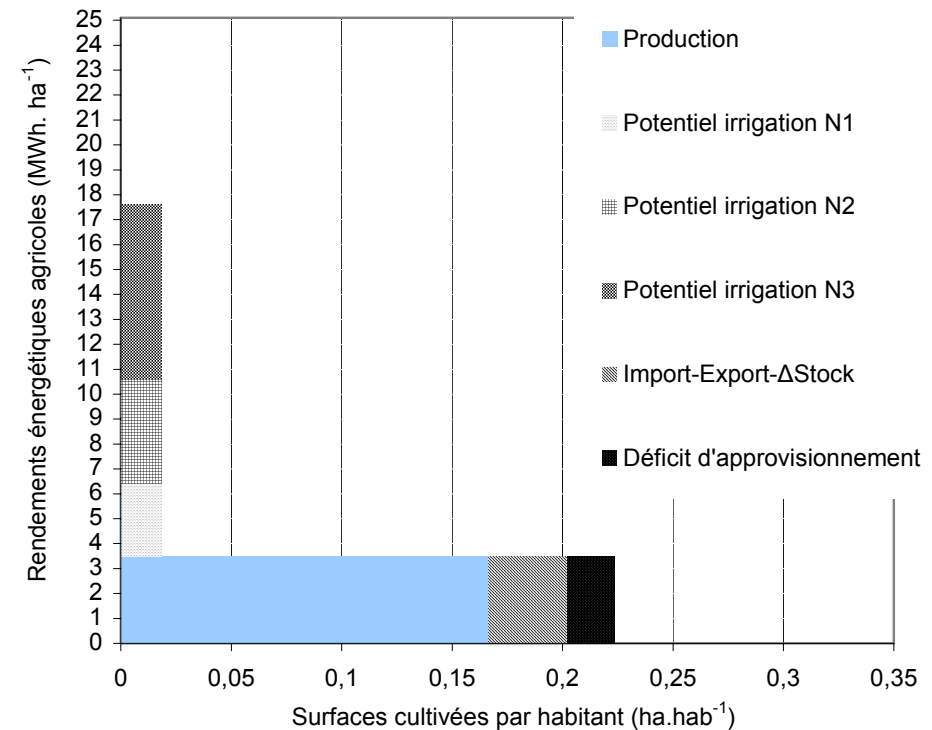
Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹ . j⁻¹



1- céréales ; 2 - racines et tubercules ; 3 - sucre ; 4 - fruits ; 5 - légumineuses ; 6 - oléagineux ; 7 - huiles végétales ; 8 - légumes ; 9 - viande ; 10 - lait ; 11 - œufs ; 12 - pêche en mer ; 13 - autres

Approvisionnement en céréales et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Tunisie

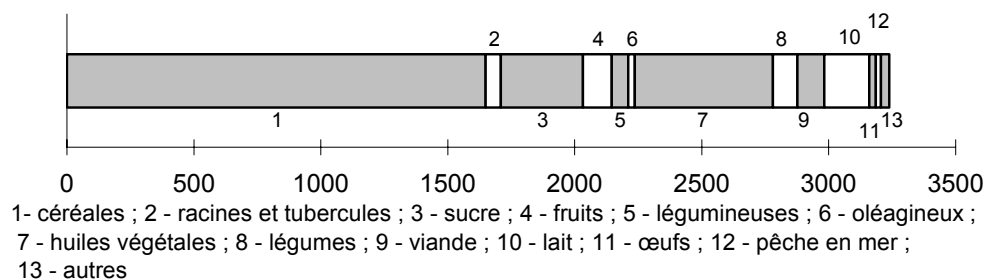
Année des données : 2002

Population	9,73	Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002)	1,1%	. an ⁻¹
DEA	3238	kcal. hab ⁻¹ . j ⁻¹
Part des céréales	50%	
Approvisionnement en céréales	4,003	Mt . an ⁻¹
Soit	1,072	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Production	0,176	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Import - ΔStock - Export	0,895	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Déficit d'approvisionnement *	0,000	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Utilisation des céréales		
Alimentation humaine	50%	
Alimentation animale	43%	
Autres usages et pertes	9%	
Agriculture (surface cultivée)	4,908	Mha
Surface cultivée	0,5045	ha . hab ⁻¹
<i>dont céréales</i>	0,042	ha . hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	4,18	MWh . ha ⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004)	1,055	MWh . ha ⁻¹
Irrigation	0,381	Mha
Surface irriguée	0,0392	ha . hab ⁻¹
Surface irrigable	0,0579	ha . hab ⁻¹
Ressources en eau	4,56	Gm ³ . an ⁻¹
Volume d'eau disponible	469	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
Volume d'eau mobilisé	280	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
<i>dont volume utilisé pour l'irrigation</i>	229	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹

* déficit en céréales pour atteindre 50% de 2700 kcal.hab⁻¹.j⁻¹

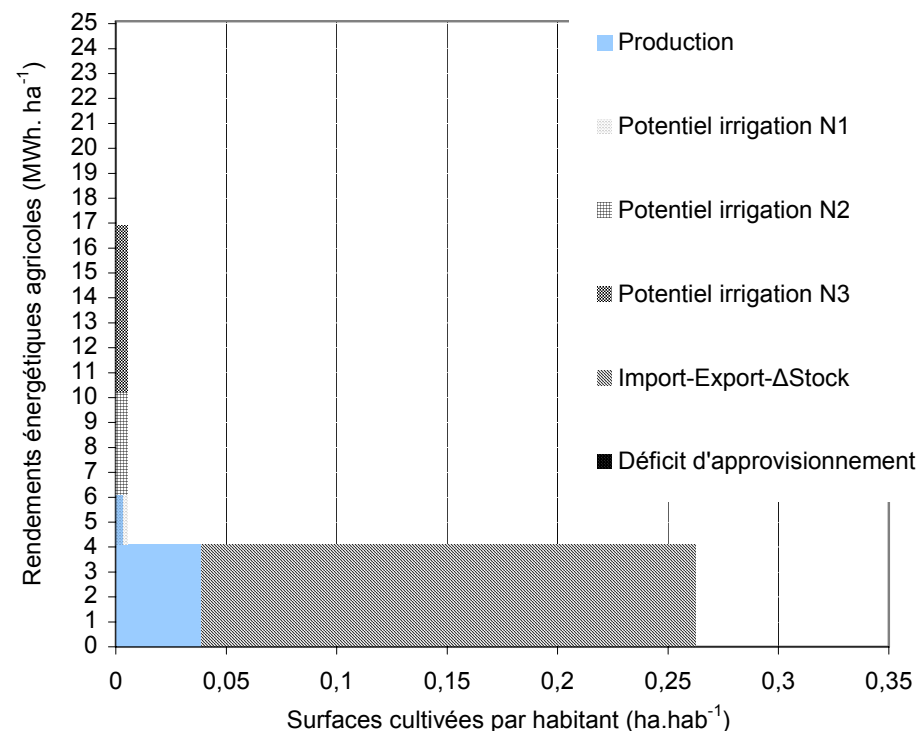
Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹.j⁻¹



Approvisionnement en céréales

et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Zambie

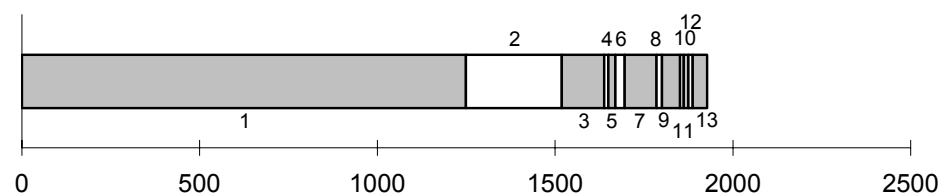
Année des données : 2002

Population	10,70	Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002)	1,2%	. an ⁻¹
DEA	1927	kcal. hab ⁻¹ . j ⁻¹
Part des céréales	65%	
Approvisionnement en céréales	1,775	Mt . an ⁻¹
Soit	0,801	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Production	0,247	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Import - ΔStock - Export	0,342	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Déficit d'approvisionnement *	0,212	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Utilisation des céréales		
Alimentation humaine	89%	
Alimentation animale	2%	
Autres usages et pertes	8%	
Agriculture (surface cultivée)	5,289	Mha
Surface cultivée	0,4944	ha . hab ⁻¹
<i>dont céréales</i>	0,049	ha . hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	5,01	MWh . ha ⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004)	0,646	MWh . ha ⁻¹
Irrigation	0,046	Mha
Surface irriguée	0,0043	ha . hab ⁻¹
Surface irrigable	0,0486	ha . hab ⁻¹
Ressources en eau	105,2	Gm ³ . an ⁻¹
Volume d'eau disponible	9834	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
Volume d'eau mobilisé	162	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
<i>dont volume utilisé pour l'irrigation</i>	123	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹

* déficit en céréales pour atteindre 65% de 2700 kcal . hab⁻¹ . j⁻¹

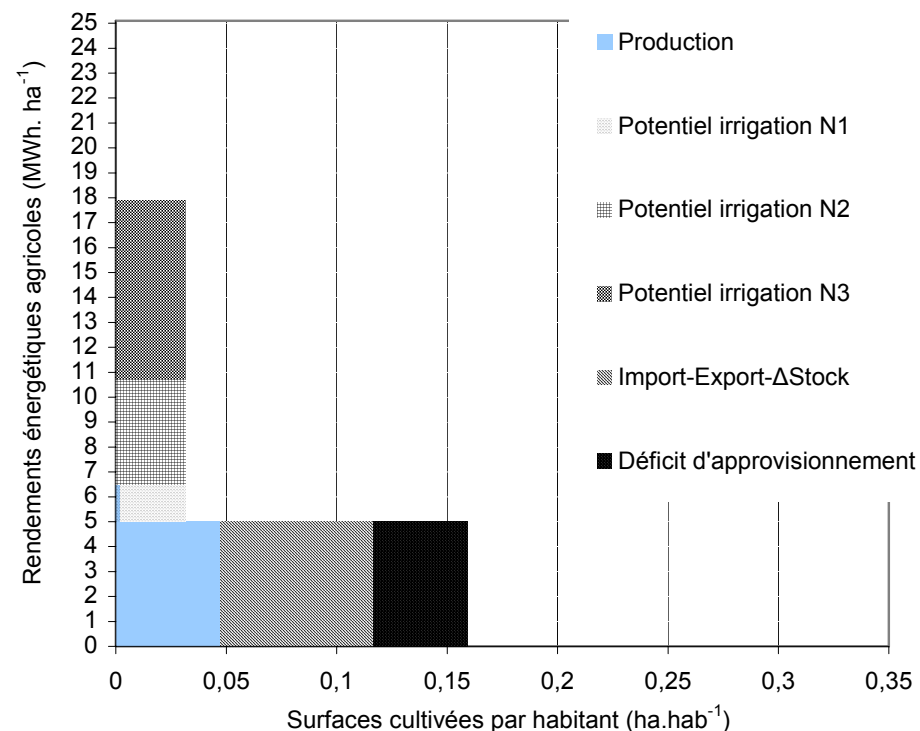
Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹ . j⁻¹



1- céréales ; 2 - racines et tubercules ; 3 - sucre ; 4 - fruits ; 5 - légumineuses ; 6 - oléagineux ; 7 - huiles végétales ; 8 - légumes ; 9 - viande ; 10 - lait ; 11 - œufs ; 12 - pêche en mer ; 13 - autres

Approvisionnement en céréales et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

FICHES PAYS

Zimbabwe

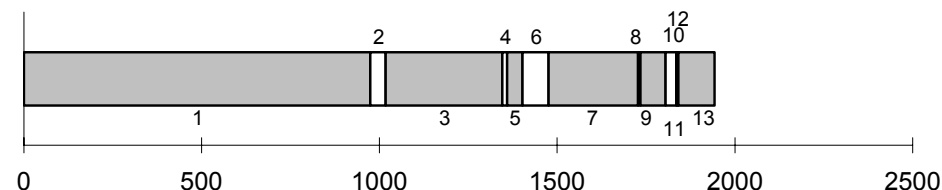
Année des données : 2002

Population	12,84	Mhab
Accroissement annuel (2001 - 2002)	0,6%	. an ⁻¹
DEA	1943	kcal. hab ⁻¹ . j ⁻¹
Part des céréales	50%	
Approvisionnement en céréales	1,823	Mt . an ⁻¹
Soit	0,635	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Production	0,198	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Import - ΔStock - Export	0,277	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Déficit d'approvisionnement *	0,160	MWh . hab ⁻¹ .an ⁻¹
Utilisation des céréales		
Alimentation humaine	87%	
Alimentation animale	3%	
Autres usages et pertes	11%	
Agriculture (surface cultivée)	3,35	Mha
Surface cultivée	0,261	ha . hab ⁻¹
dont céréales	0,129	ha . hab ⁻¹
Rendement moyen (céréales)	1,54	MWh . ha ⁻¹
Ecart type rdt sur 11 ans (1994 - 2004)	1,289	MWh . ha ⁻¹
Irrigation	0,117	Mha
Surface irriguée	0,0091	ha . hab ⁻¹
Surface irrigable	0,0258	ha . hab ⁻¹
Ressources en eau	20	Gm ³ . an ⁻¹
Volume d'eau disponible	1558	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
Volume d'eau mobilisé	203	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹
dont volume utilisé pour l'irrigation	175	m ³ . hab ⁻¹ . an ⁻¹

* déficit en céréales pour atteindre 50% de 2700 kcal.hab⁻¹.j⁻¹

Les autres produits sont déficitaires dans les mêmes proportions

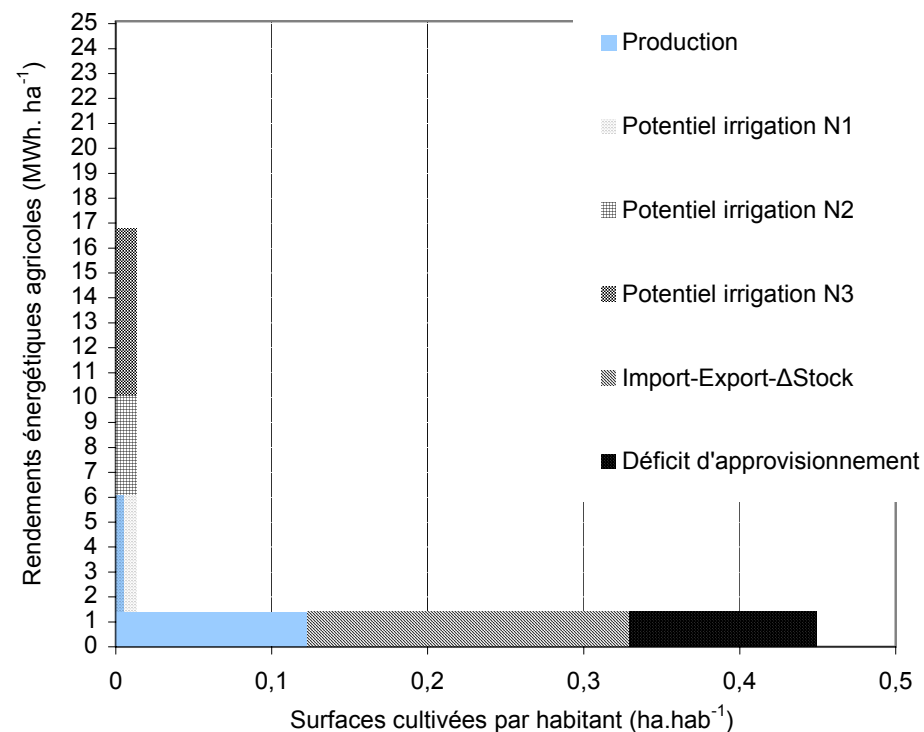
Apports énergétiques par type d'aliment kcal. hab⁻¹. j⁻¹



1- céréales ; 2 - racines et tubercules ; 3 - sucre ; 4 - fruits ; 5 - légumineuses ; 6 - oléagineux ; 7 - huiles végétales ; 8 - légumes ; 9 - viande ; 10 - lait ; 11 - œufs ; 12 - pêche en mer ; 13 - autres

Approvisionnement en céréales

et potentiel de production en agriculture irriguée



Sources : FAOSTAT et AQUASTAT

LA MAITRISE DE LA DEMANDE EN EAU ET EN ENERGIE EN AGRICULTURE IRRIGUEE : DE L'EVALUATION DES ENJEUX A LA PROPOSITION D' ACTIONS CIBLEES

Ce travail s'appuie sur des résultats d'études de terrain obtenus au Maroc, en France, en Egypte et en Inde. Il a pour objet de développer une approche résolument tournée vers la préparation à l'action. **Les flux d'énergie alimentaire, d'eau et d'énergie commerciale** impliqués dans les systèmes d'alimentation et de production agricole irriguée **sont évalués en conjuguant contraintes, fonctions et objectifs** des systèmes étudiés. L'approche utilise des connaissances et des données des domaines de la nutrition et de l'alimentation, de l'agriculture irriguée et de la maîtrise de la demande en flux (eau et énergie). **Trois outils complémentaires de préparation à l'action** sont ensuite proposés. A l'échelle nationale, l'opportunité de satisfaire les besoins alimentaires par le développement de l'irrigation est évaluée pour quatre contextes. Des fiches pays sont proposées pour 36 pays d'Afrique. Deux outils, en synergie, sont développés pour l'échelle pratique de l'exploitation agricole et l'échelle de diffusion territoriale (unités physiques, administratives ou opérationnelles). L'organisation et les moyens à mettre en œuvre pour développer un programme de diagnostic sont explicités au niveau des territoires. Le diagnostic des performances eau-énergie des exploitations permet d'identifier et de valider des actions techniques. Les résultats obtenus sur les exploitations sont synthétisés, à l'échelle territoriale, pour définir des actions ciblées qui sont tout à la fois adaptées aux stratégies d'exploitants, aux besoins de développement du territoire et aux objectifs nationaux en terme d'alimentation et de valorisation des ressources.

Mots clés : agriculture, irrigation, alimentation, eau, énergie, outils, diagnostic, intégré

WATER AND ENERGY DEMAND SIDE MANAGEMENT IN IRRIGATED AGRICULTURE: FROM EVALUATION OF THE STAKES TO TARGETED ACTIONS PROPOSAL

This work relies on field studies from Morocco, France, Egypt and India. Its purpose is to build an approach with a high capacity for preparation to field action. **Food flows of energy, water and commercial energy** implied in the irrigated agricultural production and feeding systems are evaluated using and combining **constraints, functions and objectives** of the studied systems. The approach uses knowledge and data from the nutrition and food fields, irrigated agriculture and water and energy management. **Three complementary tools** for action preparation are here proposed. On a **national scale**, the opportunity to satisfy food needs by irrigation development is evaluated in four contexts. We present country sheets applied for 36 countries of Africa. Two tools, in synergy, are developed for the **practical farm scale** and **territory scale** enhancing broadcasting (physical, administrative or operational units). Organization and means to implement in order to develop a diagnostic program are clarified on the territory level. On farm diagnostics of water and energy performances allows identification and validation for technical actions. We synthesize farm results on territory scale in order to precise targeted actions. These actions are at once adapted to farmer strategies, territory development and national purposes for both feeding and enhancing the value of resources.

Keywords: agriculture, irrigation, food, energy, tools, diagnostic, integrated

