

Les interactions eau-énergie : une approche des enjeux aux différentes échelles

Jean-François BONNET

Laboratoire TREFLE UMR CNRS 8508 ENSAM Université Bordeaux 1 ENSCPB
site ENSAM, Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence Cedex
jean-francois.bonnet@u-bordeaux1.fr

Attention : ce document est une version Draft. Une note synthétique de 8-10 pages sera produite avant la fin août, pouvant porter l'accent sur quelques points particuliers mentionnés ici.

Ce document propose une présentation générale des couplages eau-énergie et une analyse rapide des enjeux associés. Il fait référence à différents travaux scientifiques et techniques menés ou suivis depuis 1998 en relation avec le sujet, à l'université Bordeaux 1 et au Trefle. Différents résultats sont empruntés au travail de thèse de X. Goossens sur les questions énergétiques en irrigation, et à plusieurs travaux en commun. Sur la question « eau et bioénergies », il fait également référence au travail en cours sur l'étude prospective CLIP « eau et biocarburants 2030 en France », conduite en collaboration avec D. Lorne (IFP).

1. Introduction

Le développement des populations et des activités humaines s'accompagne de la mobilisation de ressources naturelles, en particulier ressources en eau, et ressources énergétiques. L'extraction, la production, le transport, l'utilisation de ces dernières mettent en jeu un certain nombre d'interactions, souvent fortes, entre l'eau et l'énergie, qui engendrent des contraintes d'utilisation et des impacts environnementaux secondaires. Selon les situations, les impacts et contraintes sont plus ou moins forts : véritables enjeux de développement, problèmes d'optimisation technico-économique, conditions d'innovation, ...

Ce document propose une approche générale des problèmes de couplage entre les mobilisations de l'eau et celles de l'énergie. Cette approche repose sur une description physique des systèmes et des flux impliqués, à des fins d'interprétation et de préconisation dans les domaines vastes et complexes abordés. Selon les problématiques, on sera amené à développer une ou plusieurs dimensions de l'analyse (dimension physique, énergétique, technique, économique, organisationnelle, ...), qui apparaîtront dominantes ou structurantes pour le problème étudié.

A l'origine, cette approche générale et englobante des couplages eau-énergie s'est construite à partir d'un questionnement très concret d'évaluation environnementale : *comment comparer, en termes d'impacts environnementaux, deux options de refroidissement d'un système technique, l'une consommant de l'eau et l'autre consommant de l'énergie ?* Les deux solutions présentent, en termes physiques quantifiables, peu de points directs de comparaison. En revanche, on sait que la fourniture d'eau réclame de l'énergie, et que la production d'électricité mobilise flux d'eau importants. Les approches disponibles, de type analyse de cycle de vie, ne rendent pas compte de la dimension spécifiquement

locale de certains impacts, en particulier sur les différentes ressources en eau. Pourtant, les situations nécessitant d'arbitrer entre les impacts sur l'eau et ceux sur l'énergie sont très nombreuses (par exemple, comme éléments d'arbitrage dans les débats sur l'hydroélectricité). Ces questions sont encore insuffisamment explorées. Les réelles difficultés méthodologiques, le caractère transversal du questionnement, la variété des situations à prendre en compte, contribuent à expliquer ce manque d'éléments de réponse. Un questionnement très technique, associé à l'étude de problématiques plus larges, à différentes échelles, constitue une ossature solide pour le développement d'une *culture* des problèmes eau-énergie.

Chercher à répondre à ces questions nécessite en effet de pouvoir aborder les deux domaines, celui de l'eau et celui de l'énergie, de façon équilibrée, au croisement du monde de l'eau et du monde de l'énergie. Compte tenu du caractère local des ressources en eau, les arbitrages avec l'énergie seront très différents selon qu'on prélève sur une ressource menacée ou sur une ressource surabondante. Pour l'énergie, dont les impacts à caractère global prédominent le plus souvent, *comment parvenir à mettre ces impacts globaux en balance avec les impacts locaux sur l'eau ?* On pourrait être tenté de résumer la problématique d'évaluation par cette question. On cherchera ainsi à déterminer la nature des impacts dans chaque domaine, à produire des indicateurs, démarches et outils d'évaluation, à disposer à terme de boîtes à outils de méthodes comparatives... Ces finalités opérationnelles doivent orienter le travail, et s'assortir de réflexions sur la portée, les limites et les atouts des méthodes, qu'il convient toujours de positionner par rapport aux champs disciplinaires de référence dans les problèmes abordés. Des productions opérationnelles qui ne seraient pas confrontées à l'expertise disciplinaire feraient indûment l'économie de deux rétroactions importantes :

- la validation et la détermination des domaines de validité des méthodes,
- en retour, la stimulation de nouvelles activités de recherche dans les champs disciplinaires concernés.

Les problèmes de couplages, en termes scientifiques, sont bien, par nature, un lieu de rencontre entre disciplines.

Mais les problématiques sont bien plus larges et plus riches : il y a lieu, par exemple, d'étudier :

- des situations d'impacts cumulatifs eau-énergie,
- des situations de larges choix d'itinéraires de développement,
- des situations où le questionnement énergétique conduit à reconsidérer la façon de poser les problèmes sur l'eau : pour prendre un exemple proche du terrain, un diagnostic énergétique d'un réseau AEP est l'occasion de réexaminer la performance en eau des infrastructures, et de proposer des améliorations concourantes sur l'eau et sur l'énergie,
- et, de façon symétrique, des situations où le questionnement « eau » pose de façon différente certaines questions énergétiques. Par exemple, le manque de disponibilité en eau peut conduire à étudier préférentiellement des filières énergétiques « sans eau », à revoir les schémas d'implantation des infrastructures et réseaux énergétiques, ...

Pour être en mesure d'apporter des éléments de réponse concrets à ces questions, il s'agit :

- de comprendre et décrire globalement les systèmes et les phénomènes impliqués, d'un point de vue physique, mais aussi pour certains aspects du point de vue socio-économique,

- de tenir compte des aspects communs aux filières de mobilisation de l'eau et de celles de l'énergie (notion de service, de chaîne de mobilisation, rôle des opérateurs, notions de maîtrise de l'eau et de l'énergie,...)
- de prendre en compte les particularités des filières eau ou énergie : en particulier, pour la gestion de l'eau le caractère local et souvent partagé des ressources (partage des ressources, multiplicité des acteurs, etc.
- de maintenir des interfaces fortes avec les problèmes de terrain (études techniques, participation à des groupes de travail techniques ou thématiques, etc.),
- de tourner la réflexion méthodologique à la fois vers des questions de méthode proprement dites (construction, validité, positionnement par rapport aux champs disciplinaires, prise en compte des dimensions nouvelles dans les situations abordées) et vers les questions opérationnelles (approches outil, positionnement par rapport aux outils existants, état de l'art du praticien, ...)
- de produire les connaissances et compétences nécessaires pour aborder des problématiques à la fois essentielles et insuffisamment traitées. Le domaine des productions énergétiques exploitées des écosystèmes (Bonnet, 1998 ; Bonnet et Combarous, 2001) représente sans doute le meilleur exemple. Dans une lecture globale de la problématique eau-énergie, il est très vite apparu que la mobilisation des ressources de biomasse végétale constituait un point de croisement essentiel de l'eau et de l'énergie. Les productions végétales, qu'elles soient pour l'énergie alimentaire ou pour l'approvisionnement en bioénergies, sont en relation directe avec le cycle de l'eau quantitatif, et peuvent générer des impacts très significatifs d'atteinte à la qualité de l'eau par les pollutions diffuses.

2. Notions et représentations dans les interactions eau-énergie

2.1. Les impacts environnementaux « eau, énergie »

Sont mentionnés ici quelques rappels sur les impacts environnementaux associés à la mobilisation des ressources naturelles en eau et en énergie.

2.1.1. Energie

On considère en premier lieu les impacts globaux : réduction des ressources épuisables (combustibles fossiles, uranium), émissions de gaz à effet de serre (GES) et réchauffement climatique. La problématique de la gestion des déchets nucléaires à vie longue peut également apparaître comme un impact global, compte tenu de la durée de vie de ces déchets. Les impacts locaux sont notamment liés aux émissions des polluants locaux des combustibles, et aux impacts liés à l'aménagement des sites d'extraction et de production (mines, ouvrages hydrauliques, ...). La question de l'impact paysager de certaines solutions renouvelables, relevant plutôt d'appréciations subjectives et contextuelles, n'est pas abordée ici.

Impacts sur l'eau

De nature fortement locale, les impacts sur l'eau peuvent être quantitatifs (quantité d'eau prélevée dans le milieu naturel) ou qualitatifs (pollution, dégradation de la qualité de l'eau). On identifie assez facilement les pressions environnementales, quantifiables ou non. La connaissance des impacts sur les systèmes naturels nécessite d'étudier la relation pression – ressource, par des études locales fines et spécifiques à la ressource et à la pression appliquée ou par des méthodes dérivées.

2.2. La matrice des interactions

La construction d'une matrice des couplages eau-énergie (Goossens et Bonnet, 2001) permet de situer les ordres de grandeur des flux et des couplages pour les différents secteurs d'activité (résidentiel-tertiaire, industries, agriculture, ...). Cette représentation permet de comparer les situations de quelques pays, développés (France, Etats-Unis) ou en développement (Inde, Chine). La situation de l'Inde est particulière et remarquable : de 25% à 30% de la consommation électrique nationale est dédiée à la production alimentaire par l'agriculture irriguée.

Pays	Eau pour la production d'énergie Part des prélèvements	Energie pour la production d'eau Part de la consommation d'énergie	
		Primaire	Electrique
France	50,6%	1,6%	3,4%
USA	41,9%	1,6%	4,3%
Arabie Saoudite	20,3%	3,7%	nd
Chine	14,9%	1,7%	5,5%
Inde	3,1%	8,9%	30,5%

Tableau 1 – L'intensité des couplages eau-énergie pour 5 pays du monde

Exemple d'application à des échelles territoriales : Bassin Adour Garonne, Région Aquitaine

Appliquée à des échelles territoriales plus petites, cette approche permet d'avoir une présentation synthétique des grands chiffres de l'eau et de l'énergie (Minnei, 2008). La et le présentent le principaux chiffres des croisements eau-énergie pour le Bassin Adour Garonne et pour la Région Aquitaine.

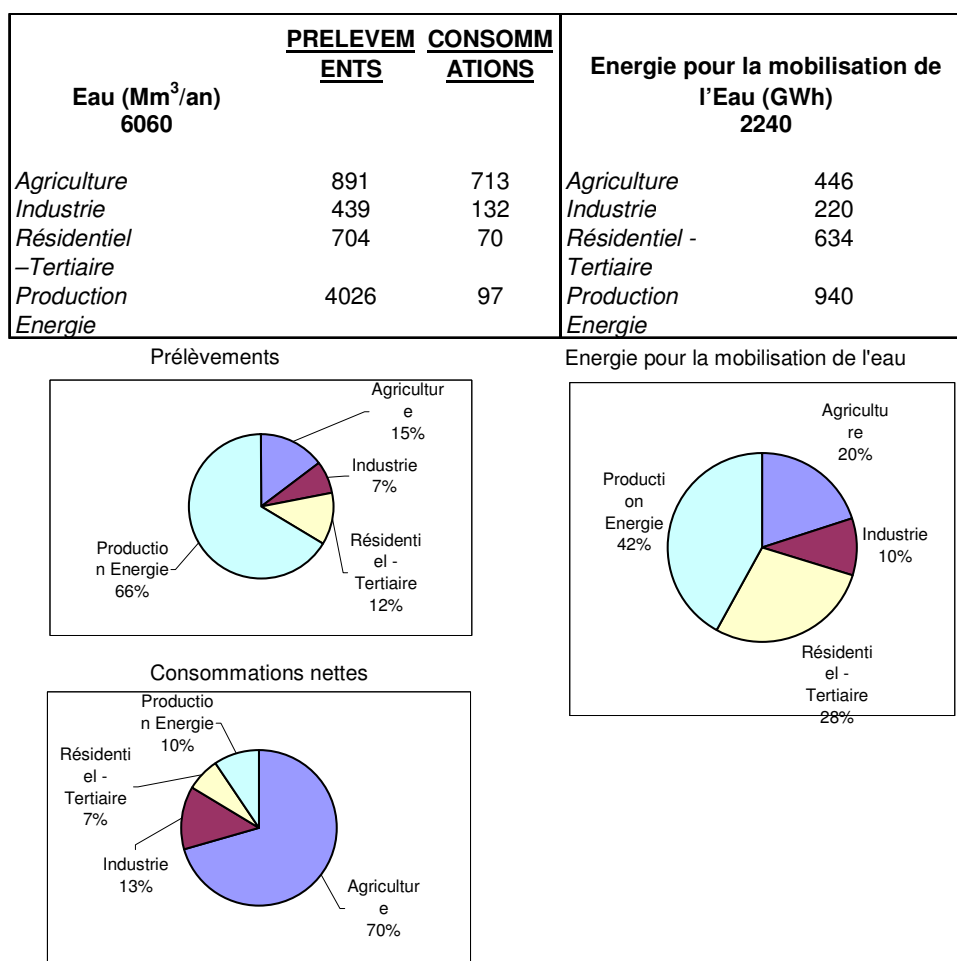


Figure 1 – Les grands chiffres des croisements eau-énergie dans le Bassin Adour Garonne (adapté de Minnei, 2008)

Eau (Mm ³ /an) 4944	PRELEVEMENTS	CONSOMMATIONS	Energie pour la mobilisation de l'Eau (GWh) 1175	
Agriculture	444	355	Agriculture	222
Industrie	242	73	Industrie	121
Résidentiel	318	32	Résidentiel -	286
-Tertiaire			Tertiaire	
Production	3940	39	Production	546
Energie			Energie	

Tableau 2 - Les grands chiffres des croisements eau-énergie dans le Bassin Adour Garonne (adapté de Minnei, 2008). Les prélèvements pour la production d'énergie sont ceux calculés pour le CNPE du Blayais, prélevant dans l'Estuaire de la Gironde.

2.3. Les approches de systèmes type et situations type

On cherche à produire des éléments de compréhension et d'analyse en décrivant des situations type, à l'image par exemple des espèces modèles étudiés en biologie. Nécessairement simplifiées, ces situations permettent de dégager les caractéristiques principales des problèmes, d'étudier leurs relations d'une façon qualitative ou qualitative, et de produire des éléments d'évaluation. Basées sur des relations physiques, énergétiques, biologiques ou agronomiques, elles permettent à ma fois d'obtenir des valeurs représentatives, et de pouvoir discuter ces valeurs et analyser le cas échéant leur sensibilité à différents paramètres.

2.4. Les problématiques type pour les couplages

L'étude des couplages eau-énergie fait montre qu'il existe des problématiques type, très différentes les unes des autres, selon les situations étudiées.

Les interactions eau-énergie peuvent :

1. Etre un enjeu de développement : par exemple, la disponibilité de l'énergie gouverne l'accès à l'eau. Cette situation apparaît pour certains pays en développement, mais peut également apparaître, dans une moindre mesure, pour les pays développés
2. Etre objet de rationalisation technique : en particulier dans les pays développés, les couplages eau-énergie posent des problèmes technico-économiques nécessitant de déployer une ingénierie spécifique. Par exemple, la maîtrise de l'énergie dans les infrastructures des services de l'eau
3. Etre porteuses d'opportunités d'innovation scientifique, technique, ou organisationnelle : les situations de couplage nécessitent d'innover dans la résolution des problèmes. Par exemple, en irrigation, la question de l'énergie est liée à la maîtrise de l'eau et nécessite une approche prenant en compte les particularités des exploitations agricoles, en tant qu'objets énergétiques mais aussi en tant qu'acteurs de l'eau
4. Agir comme un effet de levier (avec des rétroactions positives, ou des rétroactions négatives). Par exemple, une amélioration sur l'eau implique une

amélioration sur l'énergie ; ou au contraire une amélioration sur l'eau coûte en énergie,

5. Constituer un point d'entrée : par exemple, la recherche d'amélioration énergétique conduit à réexaminer la performance des systèmes (ex : réseaux d'eau) et à engager ou à accélérer des démarches d'amélioration sur l'eau.

3. Etude de situations représentatives dans les couplages eau-énergie

3.1. *Energie pour l'eau*

3.1.1. Enjeux de maîtrise de l'énergie dans les services de l'eau (eau potable, assainissement)

- a) Problématiques en pays développés et en pays en développement

Il y a lieu de prendre en compte deux types de situations très différentes, celle des pays développés et celle des pays en développement. Les remarques formulées ici proviennent de l'étude de différents cas, et d'une approche générale des systèmes et les ressources (Goossens et Bonnet, 2001).

Pour les pays développés, dans leur ensemble, les situations présentent des caractéristiques relativement stables :

- les services (approvisionnement en eau potable – AEP, et assainissement) sont fortement ou pleinement développés,
- les quantités d'énergie mises en jeu prennent une place importante dans les coûts d'exploitation des services
- dans les bilans énergétiques nationaux, les consommations énergétiques pour les services de l'eau, assez fréquemment sous-estimées, prennent une place assez faible, de l'ordre de 1% à 2% des consommations électriques nationales. Cela est du à l'ampleur des autres usages sectoriels (résidentiel, transport, industries),
- ces consommations, bien localisées et identifiées, présentent toutefois des marges d'optimisation énergétique souvent significatives et nécessitent d'être étudiées de façon systématique,
- les pertes d'eau en réseau de distribution, lorsqu'elles sont excessives, contribuent à dégrader la performance énergétique des infrastructures,
- en outre, dans certains domaines, la sensibilité des consommations énergétiques aux choix d'infrastructures, de ressources et de filières est importante : nature des ressources, choix d'infrastructure pour l'AEP ; choix des technologies d'épuration et des filières de traitement des boues, pour l'assainissement.
- localement, en fonction de la disponibilité et de la qualité des ressources, les besoins en traitement, acheminement, épuration, peuvent varier et conduire à des situations assez hétérogènes, sans toutefois conduire à des écarts excessifs dans les consommations d'énergie.

Les enjeux de la maîtrise de l'énergie dans les services d'AEP relèvent clairement, dans ces situations, de problématiques d'optimisation technico-économique et de rationalisation de la gestion.

Pour les pays en développement, les situations diffèrent selon l'abondance et la qualité des ressources, et selon le type de développement. Les zones climatiques, plus variées que pour les pays développés, ont également leur importance lorsqu'il s'agit d'examiner les ressources en eau. Dans de nombreuses villes en zone aride ou semi aride (sud méditerranéen, par exemple), le service de l'eau est fréquemment discontinu et la potabilité de l'eau n'est pas garantie. L'assainissement insuffisamment développé conduit à une pollution significative des ressources (par exemple, pollution nitrates, dans certaines situations pollutions toxiques, etc...). Les zones urbaines, généralement dotées de réseaux de collecte des effluents, ne disposent souvent pas des installations d'épuration adaptées. Le financement des équipements reste un problème majeur. Le choix de technologies abordables peut jouer un rôle dans ce dispositif. En zone rurale, l'accès à l'eau potable reste souvent problématique, à l'exemple de nombreux villages d'Afrique subsaharienne. Le développement et le financement d'infrastructures d'approvisionnement reste un point important, sur initiatives locales ou dans le cadre de programmes nationaux ou régionaux. Dans les zones climatiques de précipitations plus abondantes, les questions de qualité d'eau et de pollutions restent fréquemment d'actualité dans les zones densément peuplées. On rencontre cette situation dans de nombreuses villes de Chine ou d'Inde, par exemple. Ces questions de gestion de l'eau englobent, davantage qu'ailleurs, des dimensions socio-économiques et de gouvernance : lorsque les ressources économiques ne permettent pas de déployer l'arsenal technologique disponible pour capter et traiter les ressources, d'autres types de solutions sont à rechercher, qui agissent sur les émissions de polluants, sur l'organisation de la distribution d'eau, etc. Réclamant elles aussi des moyens financiers et humains, mais présentant souvent des besoins en équipements plus faibles, ces solutions nécessitent une étude approfondie et un suivi permanent. L'exemple du scénario 3 pour Jaïpur (Province du Rajahstan, Inde) en est une bonne illustration (cf § 3.1.3).

b) Maîtrise de l'énergie dans les infrastructures d'approvisionnement en eau potable (AEP)

En abordant aux différentes échelles les consommations énergétiques pour l'AEP, on a pu faire apparaître des valeurs assez stables de consommation unitaire. Sur les infrastructures confiées, dans le monde, aux opérateurs de gestion déléguée, la consommation énergétique moyenne, en électricité, s'établit aux environs de 0,5 kWh/m³ (0 – 1,2 kWh/m³), soit environ 1,3 kWh/m³ d'énergie primaire (Bonnet, 2007).

• Echelle nationale

On retrouve sensiblement la même valeur pour la situation française (Bonnet, 2007 ; Goossens et Bonnet, 2001). Selon les situations (ressources en eau superficielle, ressource souterraine), la part de l'énergie du pompage et celle de l'énergie du traitement varient. Les zones de montagne ou de piémont (par exemple, les cas du piémont pyrénéen, des monts alsaciens, des pays alpins, ...), captant en altitude des ressources en eau de bonne qualité, montrent fréquemment des valeurs relativement basses. Dans certains cas, l'énergie hydraulique est récupérée par des turbines pour une production locale d'électricité (exemple de Gap). Les zones prélevant en nappes profondes une eau de qualité quasi potable (exemple des nappes profondes de Gironde), présentent des consommations dans la moyenne. Les zones prélevant une eau de rivière nécessitant des traitements poussés peuvent conduire à des valeurs relativement élevées, selon les traitements appliqués.

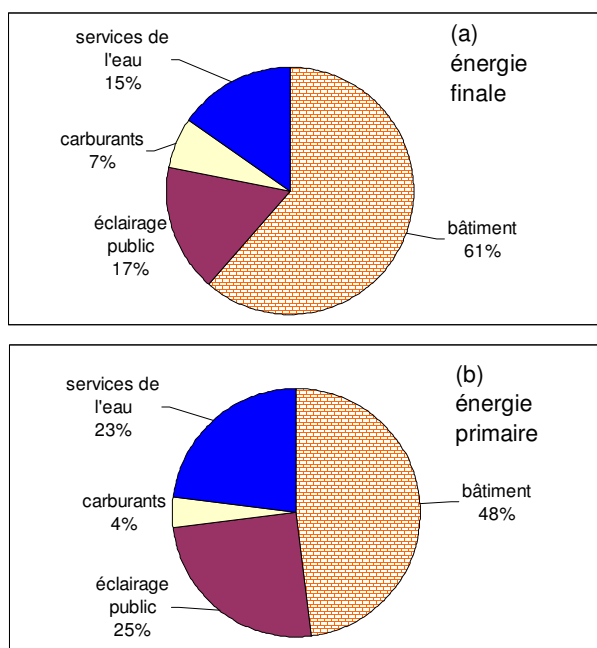


Figure 2 – Les différents postes de consommation énergétique du patrimoine municipal en France : a) en énergie finale ; b) en énergie primaire.

- **Echelle du territoire**

Grandes agglomérations

Les études conduites par les services et les opérateurs montrent, sur différentes Communautés Urbaines (Bordeaux, Rouen, etc.), des ratios de consommation énergétiques proches de la moyenne nationale ($0,5 \text{ kWh/m}^3$). Les démarches d'optimisation, portant sur le diagnostic et le dimensionnement des équipements de pompage, ainsi que sur la maintenance préventive, conduisent souvent à des gains énergétiques moyens d'environ 10% à 20%, grâce à des actions de diagnostic et de suivi général (adéquation pompes – réseaux, suivi du parc matériel, ...).

Territoires ruraux

Le territoire du pays Cœur entre deux mers (PCEDM), dans le département de Gironde, regroupe 71 communes sur lesquelles résident environ 90 000 habitants. Une étude par enquête a permis de déterminer des ratios de consommation caractéristiques du territoire, pour les services de l'eau. Ces données représentent 38% de la population desservie en eau potable. Ces données, bien que partielles, permettent de fournir une estimation des consommations énergétiques dans les conditions typiques du territoire pour l'AEP. On note, sur la Figure 3, la disparité des valeurs de ratio pour les différents syndicats intercommunaux d'approvisionnement en eau potable (SIAEP), dépendant des ressources mobilisées, de la conception et de l'exploitation des infrastructures. Sur l'échantillon observé, la dimension des réseaux (nombre d'abonnés) semble jouer favorablement pour la maîtrise des consommations, sans que les données soient suffisamment représentatives pour chercher à en tirer une règle générale.

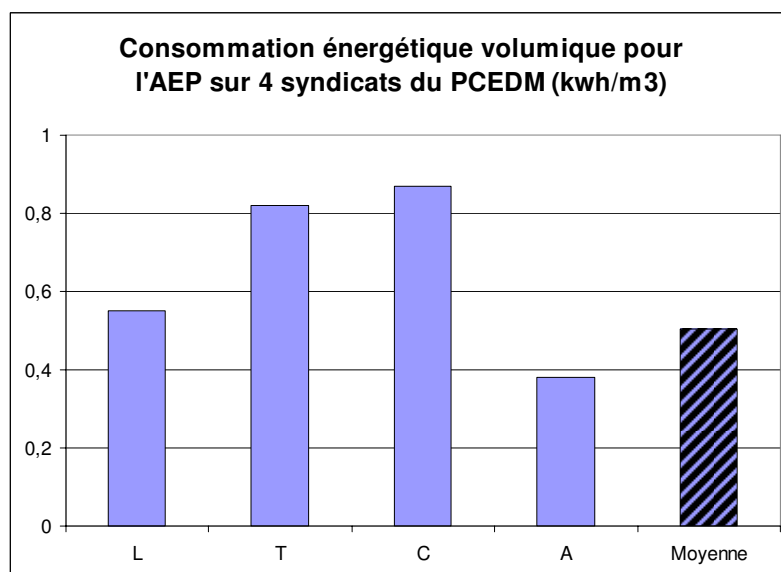


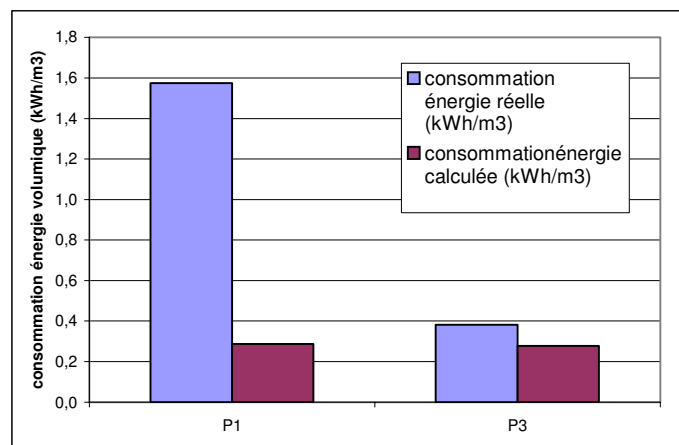
Figure 3 – Ratios de consommation énergétique pour quatre SIAEP du pays Cœur Entre Deux Mers (kWh/m³ prélevé)

- **Echelle de l'installation**

Mise en œuvre d'un diagnostic énergétique sur une installation de production d'eau potable.

L'installation étudiée est un réseau AEP en région bordelaise qui comprend deux forages profonds (désignés P1 et P3), une unité de traitement par déferrisation et chloration, un château d'eau pour distribution gravitaire en réseau (30 km de réseau principal). Ce réseau distribue environ 450 000 m³/an.

La démarche de diagnostic comprend le relevé des caractéristiques hydrauliques de l'installation (réseau, équipements), afin de calculer la consommation de référence (optimum) de l'installation. Le calcul se base sur les relations classiques de l'hydraulique (pertes de charge, courbe caractéristique de réseau, courbes caractéristiques des pompes utilisées). Les données de consommation énergétique réelle sont compilées et analysées, et confrontées au calcul de référence. Sur l'exemple étudié, la démarche met en évidence un écart dont une partie est acceptable, et un écart excessif. L'installation fonctionne en dehors de sa plage optimale et présente une forte surconsommation. Ce type de surconsommation, dont la valeur est ici sans doute très forte, est fréquemment rencontré lorsque l'installation est « vannée », c'est-à-dire munie d'une vanne partiellement fermée pour adapter le réseau hydraulique à une pompe trop puissante, par exemple. Au cas par cas, le remplacement des pompes et/ou une modification d'éléments du réseau sont à préconiser (étude de faisabilité technico-économique). Dans l'exemple cité, la pompe P1 est nettement surconsommatrice et doit être changée.



pompe forage	consommation				coût énergie/m³ (euro/m³)
	consommation énergie réelle (kWh/m³)	énergie hydraulique calculée (kWh/m³)	énergie optimum calculée (kWh/m³)	marge d'amélioration calculée (%)	
P1	1,57	0,19	0,29	82%	0,13
P3	0,38	0,19	0,28	27%	0,03

c) Maîtrise de l'énergie et des émissions de GES dans les filières d'assainissement

Globalement, pour un pays tel que la France, la consommation énergétique pour l'épuration représente l'équivalent de 0,5 kWh/m³, c'est-à-dire une valeur comparable à la consommation pour l'AEP. Selon les situations, des valeurs plus élevées peuvent être trouvées.

Les consommations énergétiques pour l'assainissement dépendent fortement du choix des technologies, et mettent en évidence un large spectre de consommation énergétique spécifique, allant des fortes consommations (boues activées,...), aux consommations faibles (lagunage aéré) ou quasi-nulles (lagunage naturel, lits de macrophytes, ...). Le choix des technologies est souvent réduit, pour des questions de surface disponible, et dans les pays développés le schéma classique de réseau de collecte gravitaire associé à une station d'épuration à boues activées domine en zone urbaine et bourgs ruraux.

Type d'opération		
Prétraitement	0,2 - 0,4	kWh/m³.j entrant
Aération	1,4 - 1,8	kWh/kg DBO5
Traitement des boues	0,1 - 0,4	kWh/kg DBO5
	15 - 60	kWh/ t Mat sèche
Désodorisation	0,1 - 0,4	kWh/kg DBO5

Tableau 3 - Exemple de valeurs techniques de consommation énergétique pour différentes opérations dans le traitement des eaux usées

En France, les situations encore susceptibles de choix ou d'évolutions technologiques sont de deux types :

- le déploiement de solutions d'assainissement en milieu rural (assainissement collectif et assainissement non collectif -ANC) : il est désormais assez systématiquement fait appel à des solutions extensives « sans énergie », de type lits de macrophytes, pour le traitement épuratoire des effluents domestiques de petits bourgs (< 2000 eh). Le déploiement de solutions extensives est parfois mis en œuvre pour l'assainissement collectif allant jusqu'à 20 000 eh (en Charente Maritime, par exemple),

- la mise à niveau des grandes ou moyennes stations d'épuration existantes, dont la conception et la construction date de deux à trois décennies. Sous l'injonction de mise en conformité par la Commission Européenne, de nombreux ouvrages doivent être revus et leurs rendements épuratoires améliorés. Les travaux engagés sur les installations existantes sont l'occasion de reconcevoir certaines parties des équipements.

L'aval des stations d'épuration, constitué par les filières de traitement des boues résiduelles de STEP, présente un intérêt tout particulier. Il y a plusieurs raisons à cela :

- les filières de traitement sont très diversifiées :
 - i. l'épandage agricole, dans le cadre de plans d'épandage et de suivis de qualité des sols. Les problématiques d'accumulation de métaux lourds, lorsque ces derniers sont présents dans les effluents et par conséquent dans les boues, constituent un frein de plus en plus fort à cette voie de valorisation des boues, qui lorsqu'elle est conduite dans les bonnes conditions présente un intérêt environnemental et agronomique indéniable,
 - ii. Le compostage : il constitue une variante de l'épandage, permettant de fournir un produit dont les qualités agronomiques peuvent être travaillées. La question de la présence de toxiques indésirables n'est pas davantage réglée que pour l'épandage direct,
 - iii. La déshydratation et le séchage en vue de valorisation agricole : consommatrice d'énergie, cette voie peut s'avérer intéressante lorsque les effluents, et par conséquent les boues, sont exempts de toxiques (par exemple, effluents et boues des industries agroalimentaires). Cette voie permet d'allonger les distances de transport et de mieux gérer le stockage.
 - iv. L'incinération ou la co-incinération. Assez fortement consommatrice d'énergie compte tenu de la siccité faible des boues traitées (environ 3% à 5% de matière sèche), cette technique peut être améliorée par une déshydratation mécanique partielle. Elle devrait s'appliquer préférentiellement lorsque le transport vers des zones d'épandage est difficile, et lorsque les infrastructures d'incinération sont présentes. Elle présente par ailleurs l'inconvénient de ne pas valoriser les minéraux à valeur agronomique présents dans les boues traitées,
 - v. La digestion anaérobie (méthanisation). Cette voie présente de nombreux avantages. (i) elle est productrice d'énergie : *le biogaz* produit, utilisé pour produire de l'électricité, permet de satisfaire plus de la moitié des besoins en énergie électrique d'une station. (ii) elle génère un sous-produit fortement valorisable : *le digestat*, dans lequel l'azote organique est conservé et déjà partiellement minéralisé, et de ce fait plus disponible pour les cultures, présente une très bonne valeur agronomique. Les boues présentent un très bon potentiel méthanogène. Elles peuvent être associées à d'autres substrats (résidus organiques, résidus végétaux, voire cultures dédiées de végétaux) en *codigestion*. Lorsque la fraction solide du digestat est séparée, elle produit un engrais stockable de bonne qualité et commode d'utilisation. La question des toxiques éventuellement présents dans les boues n'est toutefois pas réglée.

- Les filières sont interchangeables entre elles, partiellement et sous conditions technico-économiques. A l'inverse des grandes options structurantes en assainissement (choix de réseaux unitaires ou séparatifs, zonage de l'assainissement non collectif, ...), les filières de traitement des boues peuvent faire l'objet de remises en question au moment de réinvestir dans les ouvrages ou lors d'opérations de réhabilitation lourdes.
- Les filières présentent des consommations énergétiques (allant de la forte consommation d'énergie à la production nette d'énergie, déjà évoquées) et des impacts environnementaux divers et très contrastés selon les filières (émissions gazeuses de l'incinération, pollution toxique et contribution à l'eutrophisation en épandage, etc... En fonction de ces caractéristiques, les outils de l'analyse de cycle de vie s'avèrent très bien adaptés à la comparaison des options, et de nombreuses études sont disponibles dans la bibliographie.

d) Recommandations pour les services de l'eau

Dans les pays développés :

- Intégration des critères énergie et GES en amont des opérations d'aménagement et de réhabilitation lourdes. Depuis peu, l'importance de ces critères est prise en compte par les services et les opérateurs, tant dans le domaine de l'AEP que dans celui de l'assainissement (ASTEE, 2007). Plus généralement, incorporation réglementaire d'une batterie de critères environnementaux aux rapports annuels produits par les opérateurs et les délégataires de service public,
- En AEP, élaboration de programmes territoriaux de diagnostic énergétique impliquant les municipalités et intercommunalités détentrices de la compétence « AEP », les opérateurs et des acteurs privés (bureaux d'étude) spécialisés dans ce type de diagnostic. La mise en place d'une capacité de diagnostic rapide, abordable pour les gestionnaires, est un des points clés d'une telle démarche. Les syndicats ruraux, disposant parfois d'une moindre technicité, pourraient rechercher en priorité ce type de prestation. L'existence d'une capacité d'animation et de suivi, intermédiaire entre le niveau départemental et le niveau communal/intercommunal, peut constituer un facteur de succès d'une telle démarche. Les syndicats de pays, par exemple, peuvent constituer cet échelon intermédiaire.
- En assainissement, promotion de la méthanisation des boues, en tant que productrice d'énergie facilement exploitable et de fertilisant valorisable, et réduisant les volumes transportés. Actuellement peu développées, les installations de méthanisation pourraient être implantées rapidement, améliorer les indicateurs énergétiques des exploitants dans de bonnes conditions de rentabilité, le cas échéant avec la codigestion d'autres résidus. La question de la valorisation du biogaz semble assez simple, la production d'électricité pour la STEP, à partir d'une énergie résiduaire et renouvelable, apparaissant comme assez évidente. Dans une optique à plus grande échelle, les autres voies de valorisation du biogaz pourront être examinées : injection sur réseau, carburant. Ici, les enjeux du couplage peuvent résider autant dans l'optimisation que dans l'innovation et le développement de nouvelles filières.

Dans les pays en développement :

- Privilégier les solutions à faible coût énergétique semble être une mesure essentielle, en termes « d'accessibilité durable » aux services de base (eau potable, assainissement). De façon générale, les capacités de montage et de financement. Cela suppose, pour les organismes compétents, d'être en mesure :
 - i. d'étudier spécifiquement ce point,
 - ii. de rechercher des financements spécifiques, par exemple au titre du mécanisme de développement propre (MDP)
 - iii. de disposer de la technicité pour le montage et le suivi des projets, et pour la conduite des installations une fois en place.
- En milieu urbain : la question du financement des investissements et des coûts d'opération et maintenance des infrastructures reste une question centrale pour le développement des services urbains. Le coût des infrastructures n'est pas significativement plus faible que celui observé dans les pays développés. En revanche, la capacité des usagers à payer le service de l'eau est nettement plus réduite en pays en développement. Cela appelle des modes de financement et subventionnement particuliers, et incite à se tourner vers des modèles d'infrastructures développés spécifiques avec les pays en développement. Des modèles de développement à faible coût de fonctionnement, en particulier pour la consommation énergétique, sont à privilégier dans une optique de développement durable. L'épuration des effluents des villes peut faire appel, soit aux technologies rustiques, soit à la valorisation énergétiques des boues de STEP par méthanisation pour réduire les besoins énergétiques extérieurs. Toutefois, le coût d'accès à ces technologies peut constituer un frein, en l'absence de moyens de financement spécifiques,
- En milieu rural : les options techniques sont à la fois plus ouvertes et souvent plus dépendantes du contexte de ressources locales. Le déploiement de techniques d'approvisionnement en eau, qu'il soit en réseau développé desservant les habitations ou en réseau simplifié (fontaines, etc), nécessite une production d'eau abordable, pour l'opération et la maintenance, à la fois en termes de coût et de technicité disponible. Le coût énergétique de fonctionnement prend souvent une place importante. Les solutions d'énergies renouvelables, souvent recherchées, peuvent buter sur des problèmes de financement.

3.1.2. Irrigation : exemples de différentes situations dans le monde

Les résultats présentés ici sont repris des travaux de Xavier Goossens, entre 2000 et 2005, sur les croisements eau-énergie en irrigation.

A l'échelle mondiale, l'irrigation constitue un poste majeur dans les couplages eau-énergie. Les prélèvements pour l'irrigation représentent, dans le monde, 70% des prélèvements totaux. Lorsque ces prélèvements s'effectuent par pompage, avec des débits élevés, les besoins énergétiques sont également considérables. Ainsi la situation des pays asiatiques, où la riziculture et la céréaliculture irriguées sont très développées, et celle de différents pays à climat sec ou semi-aride, sont-elles particulièrement représentatives.

L'Inde, par exemple, consacre plus de 25% de la production d'électricité nationale à l'irrigation (Goossens et Bonnet, 2001). Cette dernière, reposant sur des techniques gravitaires traditionnelles, met en jeu des volumes très importants. Plus de la moitié des prélèvements provenant de nappes profondes, le besoin d'énergie de pompage s'avère très élevé.

	Localisation	Culture	Technique utilisée	Type de ressource en eau	Type d'énergie finale	Volumes prélevés		Energie finale	
						[m ³ / t]	[m ³ / ha]	[kWh / t]	[kWh / ha]
Cas 1	Agen (France)	Maïs	Aspersion - Enrouleur	Cours d'eau	Electricité	207	2278	86	941
Cas 2	Jaïpur (Inde)	Blé	Gravitaire	Nappe superficielle	Electricité	2640	6600	576	1439
Cas 3	Vallée du Nil (Egypte)	Blé	Gravitaire	Canal collectif	Gasoil	1407	8444	40	242
Cas 4	Darb El Arbaïn (Egypte)	Blé	Gravitaire	Nappe profonde	Gasoil	2857	10000	3250	11374

	Localisation	Coût par ha ¹ [€/ha]	Coût par tonne ¹ [€/t]	Rapport avec le cours mondial ²
Cas 1	Agen (France)	42	4	4%
Cas 2	Jaïpur (Inde)	77	31	18%
Cas 3	Vallée du Nil (Egypte)	2	0	0,2%
Cas 4	Darb El Arbaïn (Egypte)	80	23	13%

¹ Coût de l'énergie pour l'irrigation par ha ou par tonne produite
tenant compte des tarifs locaux de l'énergie

² Rapport entre le coût de l'énergie et le prix de vente au cours mondial

Tableau 4 - Evaluation des besoins énergétiques de l'irrigation pour 4 situations différentes dans le monde, et coûts économiques de l'irrigation en comparaison avec les cours mondiaux des produits agricoles. Ces résultats sont à interpréter en tenant compte, d'une part, du renchérissement des énergies fossiles depuis 2006, et des tensions sur les marchés internationaux des céréales depuis 2007, d'autre part (Goossens, 2005)

La Vallée du Nil en Egypte, présente des besoins en eau quantitativement élevés, avec une consommation énergétique nettement moindre compte tenu de la prédominance des apports gravitaires. Un cas extrême est donné par la situation de Darb El Arbaïn, zone de colonisation du désert reposant sur la mobilisation de la nappe profonde fossile pour l'irrigation. En technique gravitaire pour la distribution de l'eau à la parcelle, les volumes d'eau sont très élevés, ce qui compte tenu de leur coût énergétique unitaire, se traduit par des valeurs record de consommations énergétiques à l'hectare. Dans beaucoup de ces situations, l'enjeu du couplage est le facteur de développement.

- Approche de diagnostic énergétique des installations d'irrigation : le GRCETA SFA

La travail de thèse de Xavier Goossens a fait l'objet d'une application concrète avec la mise en place d'une démarche de diagnostic sur les installations adhérentes du groupement de recherche sur les cultures et techniques agricoles des sols forestiers d'Aquitaine (GRCETA-SFA). Ce groupement rassemble 140 exploitations d'irrigants en grandes cultures irriguées (maïs et légumes de plein champ, principalement). Le sol très

peu profond réclame des apports d'eau fréquents et importants. Les volumes d'eau d'irrigation à l'hectare sont supérieurs aux moyennes régionales. Une démarche de diagnostic énergétique a été mise en place sur les installations d'irrigation. Elle porte sur l'analyse des équipements, la vérification du dimensionnement des réseaux et des pompes, et sur l'étude du colmatage. Ce phénomène, du à la composition de l'eau brute, conduit à réduire les sections efficaces des conduites, et donc à augmenter significativement les pertes de charge et les consommations énergétiques. Ce diagnostic a été mis en place et conduit par Manuel Heredia, ingénieur énergétique et hydraulicien au GRCETA-SFA (Heredia, 2006 ; Heredia et al., 2008). L'enjeu du couplage réside bien dans l'optimisation technico-économique des systèmes, mais il est également porteur d'innovation dans la façon d'aborder les problèmes.

3.1.3. Contraintes d'approvisionnement en eau potable d'une ville en développement

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une étude pour le Commissariat Général au plan (Goossens et Bonnet, 2003a), dans le cadre des activités du groupe 6 « eau-énergie » (Président : Jean Audouze). Les principaux éléments de cette étude de cas ont été rassemblés lors de la mission effectuée par Xavier Goossens à Jaïpur en 2002, avec l'appui de Marcus Wijnen (Bureau Antea à Jaïpur).

La ville de Jaïpur compte, en 2002, une population de 2,4 Mhab en accroissement très rapide (+4%/an). La ressource en eau pour l'approvisionnement urbain est constituée de façon quasi exclusive par la nappe libre située sous la ville. La baisse de plus en plus marquée du niveau de la nappe et la pollution enregistrée dans les forages exploités ont conduit les opérateurs à rechercher d'autres sources d'approvisionnement par des ressources plus éloignées. Il s'agit notamment d'utiliser une partie de l'eau du barrage de Bisalpur distant de 100 km. Un tel projet se traduirait par des coûts d'investissement et de fonctionnement, en particulier énergétiques, très élevés. Le faible revenu moyen des habitants de la ville (1000 Rs, soit 22 €/mois) incite à rechercher des solutions à plus faible coût de fonctionnement. Dans ce contexte, le projet Bisalpur dont l'une des principales conséquences est la forte augmentation de la dépendance énergétique du service d'approvisionnement en eau et l'augmentation du déséquilibre financier entre coûts de production et recette, présente des risques économiques importants. Il apparaît en outre que 48% de la consommation d'électricité de la zone de Jaïpur est dédiée à l'approvisionnement en eau et à l'irrigation, cette dernière étant largement majoritaire. Par ailleurs, la recharge des nappes sous la ville s'effectue principalement par les pertes en réseau et les effluents non épurés. La concentration en polluants (nitrates, coliformes) rend l'eau de plus en plus impropre à la consommation.

L'étude du cas de Jaïpur, sur la base d'une approche outil – diagnostic, a permis de dégager 3 scénarios d'approvisionnement en eau à 20 ans :

- Scénario 1 : laisser faire
- Scénario 2 : transfert longue distance
- Scénario 3 : optimisation de l'irrigation dans une zone de 50 km autour de la ville (correspondant à la surface d'approvisionnement alimentaire de la ville), ressource locale accrue pour l'AEP de la ville, épuration des effluents urbains

Le scénario 1 apparaît intenable à moyen terme (baisse du niveau des nappes, pollution accrue. Le scénario 2 améliore l'approvisionnement en eau et la recharge des nappes,

améliore mais ne résout pas le problème de pollution, et accroît d'un facteur 5 le coût énergétique pour l'AEP. Le scénario 3 améliore le niveau et la qualité des nappes en réduisant les consommations énergétiques. Il réclame pour sa mise en œuvre un programme très ambitieux sur l'irrigation, nécessitant une action d'accompagnement auprès des agriculteurs.

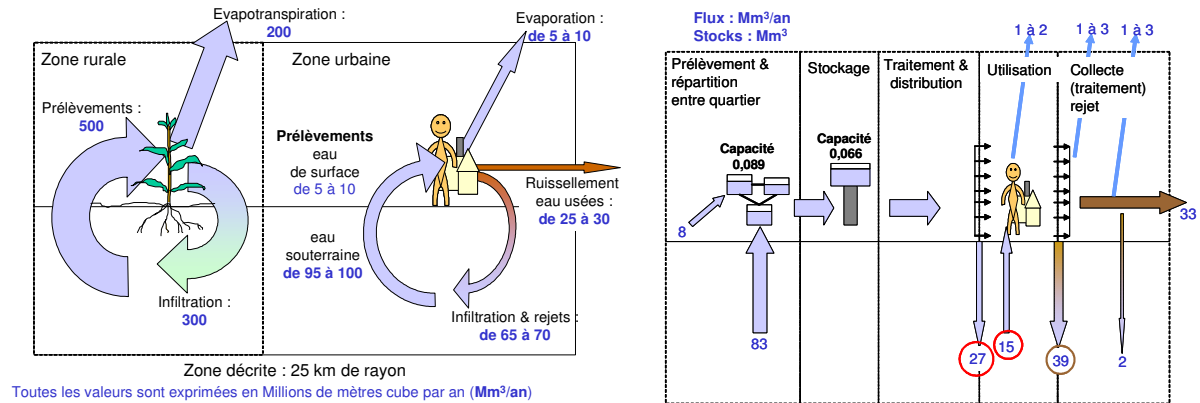


Figure 4 – les flux d'eau dans la zone de Jaipur, et les transferts dans le réseau AEP de la ville (Goossens et Bonnet, 2003a)

	2000			2020		
	S1 - Laisser faire	S2 - Transfert longue distance Bisalpur	S3 - Optimisation irrigation et prélèvements urbains, épuration	S1 - Laisser faire	S2 - Transfert longue distance Bisalpur	S3 - Optimisation irrigation et prélèvements urbains, épuration
approvisionnement AEP à Jaipur (Mm³/an)	120	120	120	260	260	260
prélèvement en nappe à Jaipur (Mm³/an)	120	0	120	260	0	260
recharge (naturelle, effluents et pertes) de la nappe à Jaipur (Mm³/an)	100	100	100	200	90	200
niveau de la nappe à Jaipur (m)	-30	-30	-30	-60	-17	-25
prélèvement pour l'irrigation dans la zone de 25 km (Mm³/an)	280	280	280	1060	1060	425
recharge dans la zone de 25 km (Mm³/an)	440	440	440	870	870	460
consommation énergie zone urbaine (GWh/an)	38	38	38	105	300	165
consommation énergie par hab., zone urbaine (kWh/hab)	14	14	14	22	63	35
consommation énergie pour l'irrigation dans la zone de 50 km (GWh/an)	380	380	380	1600	1600	380
consommation énergie par hab. pour l'irrigation dans la zone de 50 km (kWh/hab)	145	145	145	330	330	72
consommation énergie zone urbaine et rurale (GWh/an)	418	418	418	1705	1900	545

Tableau 5 – Comparaison de trois scénarios pour l'approvisionnement en eau de la ville de Jaipur (Province du Rajahstan, Inde). Le scénario S1 se traduisant par des prélèvements excessifs sur les nappes, n'est pas soutenable ; le scénario S2, reposant sur un transfert longue distance avec le réservoir de Bisalpur (100 km), est pénalisé par les coûts d'investissement et les coûts énergétiques et ne résout que partiellement la pollution locale ; le scénario S3, reposant sur une politique de maîtrise de l'eau et de l'énergie en irrigation dégageant des ressources pour l'approvisionnement local de la ville, libère une partie de la ressource locale pour l'AEP.

3.1.4. Energie pour les procédés de séparation

Dans la séparation entre matière liquide et solide, on peut considérer :

- le séchage de matériaux « solides » : naturel, ou artificiel, il réclame les mêmes quantités d'énergie mais mobilise des sources très différentes (combustibles, chaleur résiduaire, énergie solaire, ...). Actuellement, le seul séchage naturel mobilise, en ordres de grandeur, des quantités d'énergie considérables à l'échelle des consommations énergétiques mondiales (Bonnet, 1998). Il s'agit d'une forme d'énergie solaire implicite « très basse température ». On peut citer deux enjeux : dispositifs et aménagements pour l'optimisation du séchage solaire, maîtrise de l'énergie dans les technologies de séchage existantes (optimisation, conduite de séchoirs, valorisation d'énergies résiduaire, etc.).
- Les procédés séparatifs portant sur des milieux « fluides » : décantation, centrifugation, déshydratation, filtration, techniques membranaires sont des procédés variés adaptés à une grande diversité d'applications (traitement de l'eau, épuration, déjà mentionnés, industries, industries agroalimentaires, etc.). Les couplages énergétiques sont forts et sensibles au choix de procédé. L'optimisation énergétique des procédés constitue également un point de progrès important.

3.2. Eau pour l'énergie

3.2.1. Refroidissement des centrales thermiques de production d'électricité (besoins en eau, contraintes d'implantation)

Les centrales thermoélectriques de forte puissance, de l'ordre de GWe, nécessitent compte tenu de leur faible rendement (de 33% à 38%) de disposer d'une puissance de refroidissement très élevée. Ce refroidissement ne peut pas être obtenu par échange avec l'air, du fait des niveaux de puissance mis en jeu. Le refroidissement utilise l'eau comme fluide caloporteur (circuit ouvert) et évacuateur de la chaleur, ou comme source de froid par évaporation d'une fraction de l'eau circulant dans le circuit de refroidissement. La Figure 5 montre l'implantation et le mode de refroidissement des différentes tranches du parc de centrales de production d'électricité.

Centres de production nucléaire en France au 1^{er} janvier 2001

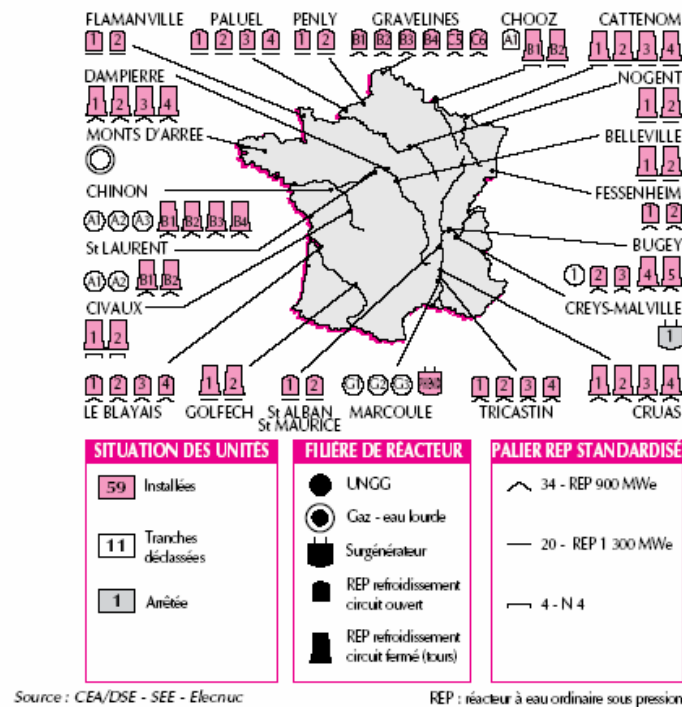


Figure 5 – Implantation des centrales thermoélectriques en France : on compte, sur cours d’eau continentaux, 14 tranches refroidies en circuit ouvert, et 30 tranches en refroidissement évaporatif (tour aéroréfrigérante). Les centrales implantées en littoral sont refroidies à l’eau de mer (figure : CEA)

Le calcul des besoins en eau est particulièrement simple :

- en circuit ouvert, il tient compte de la capacité calorifique de l’eau (approximativement 4,2 MJ/m³) et de l’échauffement de l’eau dans les échangeurs ($\Delta T = 11^{\circ}C$). Cela détermine des débits considérables, de l’ordre de 40 à 50 m³/s pour une tranche, soit environ 100 à 200 m³/s pour une centrale.
- en circuit fermé, il tient compte de la chaleur latente d’évaporation de l’eau (2300 MJ par m³ d’eau évaporée). Les circuits nécessitent un apport d’eau supérieur à l’évaporation, afin de déconcentrer l’eau du circuit en minéraux : il est tenu compte d’un prélèvement d’eau total de 1,5 fois le dédit évaporé. Cette solution permet d’obtenir des prélèvements nettement plus faibles qu’en circuit ouvert. Toutefois la consommation nette (débit évaporé) est supérieure à celle obtenue en circuit ouvert.

Les prélèvements et consommations nettes calculées mettent en évidence la part des circuits ouverts dans le débit d’eau prélevée (environ 15 Gm³/an sur les cours d’eau continentaux).

Parmi les problématiques liées au refroidissement des centrales thermoélectriques (nucléaires ou fossiles), on peut citer :

- de façon générale, une contrainte d’implantation : les centrales doivent se situer soit en littoral, soit au voisinage d’un cours d’eau de fort débit. Même en refroidissement évaporatif, le débit de prélèvement est important (environ 1,5 m³/s). Cette contrainte d’implantation peut s’avérer très forte

pour les pays secs ou arides, notamment lorsque les implantations littorales ne correspondent pas à la localisation des besoins en électricité,

- des impacts sur l'eau plutôt de nature ponctuelle, mais potentiellement significatifs. En circuit ouvert, l'échauffement des cours d'eau est négligeable compte tenu du débit suffisant des cours d'eau. En période d'étiage, les débits des cours d'eau étant au minimum, le rejet thermique peut apparaître momentanément trop élevé, et dans certaines conditions (étés chauds, température des cours d'eau élevée, etc.) conduire à des limitations de production.

	par unité				total unités		
	débit de refroidissement m ³ /s	durée de fonctionnement h/an	prélèvement Mm ³ /an	consommation nette Mm ³ /an	nombre	prélèvement Mm ³ /an	consommation nette Mm ³ /an
Cours d'eau					44	15765	879
<i>circuit ouvert</i>					<i>14</i>	<i>14667</i>	<i>147</i>
900 MW	39	7000	985	10	12	11821	118
1300 MW	56	7000	1423	14	2	2846	28
<i>circuit fermé</i>					<i>30</i>	<i>1098</i>	<i>732</i>
900 MW	0,8	7000	30	20	14	414	276
1300 MW	1,1	7000	43	28	16	684	456
Littoral					14	17294	0
<i>circuit ouvert</i>					<i>14</i>	<i>17294</i>	<i>0</i>
900 MW	39	7000	985	0	6	5911	0
1300 MW	56	7000	1423	0	8	11383	0

Tableau 6 – débits de refroidissement calculés, prélèvements et consommations nettes pour le parc de production électrique de base en France (il est tenu compte, pour les prélèvements, d'un coefficient 1,5 pour la déconcentration de l'eau de refroidissement des centrales à tours aéroréfrigérantes dites en « circuit fermé »). Les tranches implantées en littoral sont mentionnées à titre indicatif

3.2.2. Eau et production d'énergie alimentaire

L'étude des flux énergétiques dans le système alimentaire mondial (Bonnet, 1998 ; Bonnet et Combarous, 2001) fait apparaître, à l'échelle globale, les ordres de grandeur de la mobilisation des ressources de biomasse et d'eau.

la production primaire végétale requise (PPR) par les activités humaines (alimentation végétale et animale, foresterie), en majorité pour les usages alimentaires, représente environ de l'ordre de 20% de la production primaire nette (PPN) des continents. Il s'agit de la proportion strictement nécessaire à la récolte et à l'utilisation des productions végétales mobilisées, qui présente des valeurs différentes selon le type d'écosystème exploité (Figure 6).

Cela représente une mobilisation quantitative du cycle de l'eau sensiblement comparable : en calcul d'ordres de grandeur, une fraction voisine de plus de 20% de l'évaporation continentale apparaît directement nécessaire aux activités alimentaires et forestières (Figure 7). Le système de mobilisation des ressources traduit, en l'état, un niveau de pression forte sur les flux d'eau renouvelables. L'emprise des activités humaines sur les écosystèmes et sur les hydrosystèmes est très significative, sans paraître atteindre toutefois de « valeurs limites », par ailleurs très difficiles à évaluer.

Dans ce système, des marges d'amélioration ont été mises en évidence et évaluées par une approche de succession de rendements énergétiques. Ces marges reposent dans l'efficacité de la mobilisation des ressources, dans un accroissement modéré des mobilisations existantes, ainsi que dans un meilleur équilibre de la répartition des productions alimentaires. Les ressources effectivement utilisées peuvent s'accroître, à mobilisation d'eau égale, si les indices de récolte s'améliorent, ou si les résidus sont utilisés plus largement et plus efficacement.

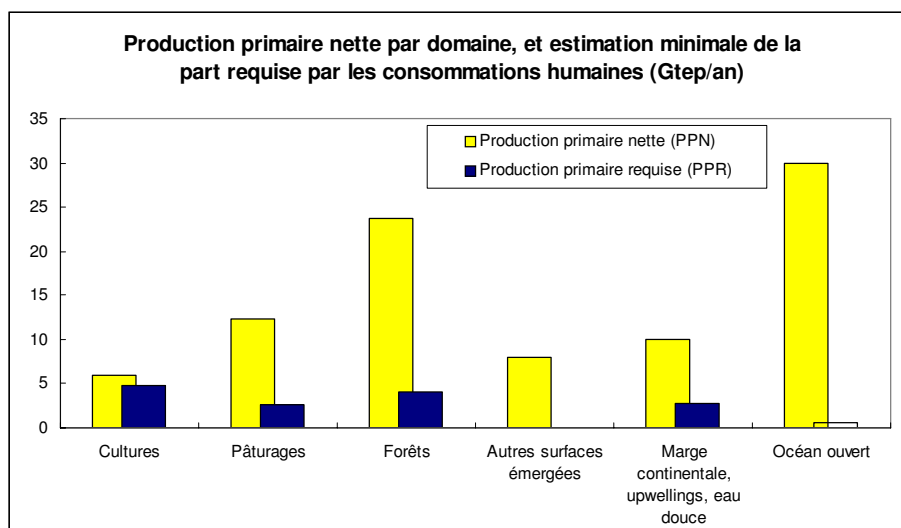


Figure 6 - La production primaire nette et la part requise par les consommations humaines, en valeurs minimales strictes, sur les différents domaines exploités (Bonnet, 1998)

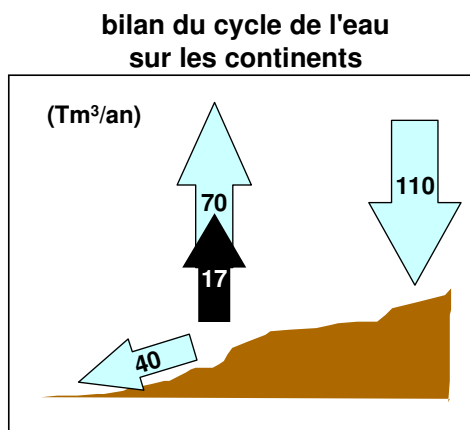


Figure 7 - Le cycle de l'eau sur les continents et la fraction du flux d'évaporation mobilisée (en noir) par les activités humaines

Par ailleurs, le système alimentaire mondial, dans son ensemble, apparaît relativement peu efficient pour l'utilisation des ressources de biomasse, et pour la répartition de ces ressources entre les différentes zones du monde. La ration alimentaire moyenne mondiale disponible, 2800 kcal/hab.jour, serait globalement suffisante pour satisfaire les besoins alimentaires de chaque habitant. L'existence d'une sous-alimentation énergétique chronique pour 850 millions d'habitants trouve sa cause dans les disparités de ressources

productives entre pays, et dans les inégalités de répartition des productions entre zones du monde. Par ailleurs, en valeur énergétique environ 27% des récoltes alimentaires, principalement en céréales, sont utilisées en alimentation du bétail (Bonnet, 1998). Globalement, le système alimentaire mondial (Figure 8) convertit, à la fin des années 90, l'équivalent de 1600 Mtep de produits végétaux (dont environ 1200 Mtep provenant des pâturages, 300 Mtep de produits agricoles vivriers et 120 Mtep de sous-produits de transformation).

Il en résulte que le système alimentaire mondial, du point de vue de la mobilisation des ressources en eau, occupe déjà une place significative, sans qu'il soit possible de conclure a priori que la place des bioénergies soit nécessairement marginale : la façon de mobiliser les ressources, l'efficacité de la mobilisation, la valorisation des résidus, les échelles d'organisation des flux et des cycles (recyclage des minéraux), sont déterminantes dans la productivité soutenable des écosystèmes. L'efficacité énergétique globale des systèmes et des filières joue en même temps un rôle très important, et détermine la productivité utile des surfaces mobilisées (Bonnet, 1998). Ainsi, les filières mettant en jeu des valorisations conjointes alimentation et énergie sont-elles à étudier avec intérêt (par exemple, valorisation de résidus en biogaz en filières rustiques dans les pays en développement).

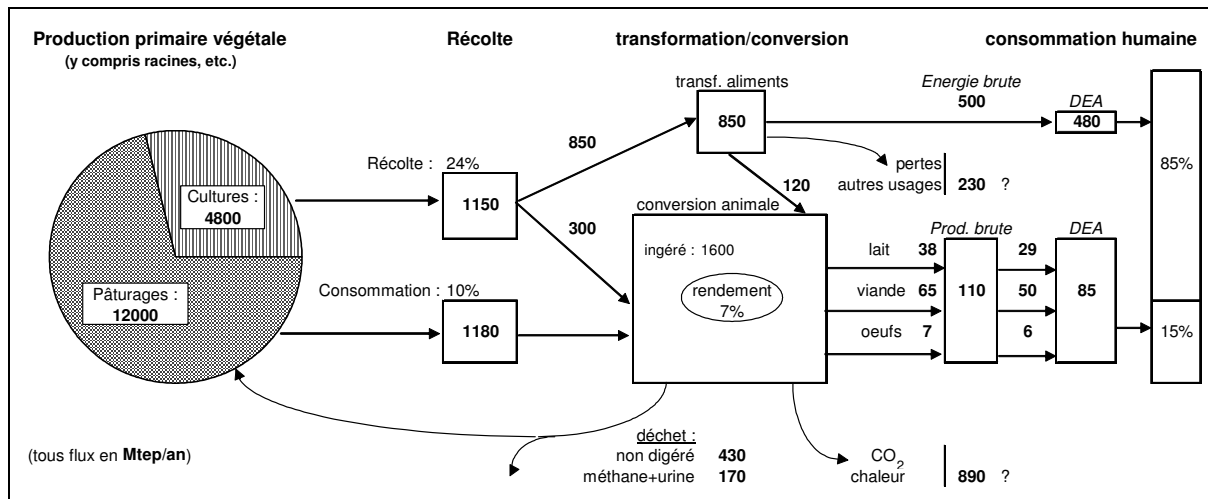


Figure 8 – Les flux énergétiques dans la production alimentaire continentale (filières végétales et animales) (Bonnet, 1998)

3.2.3. Eau et bioénergies

Cette partie reprend une partie du travail de l'étude CLIP « étude prospective de l'impact sur l'eau du développement des biocarburants en France à l'horizon 2030 », conduite en collaboration avec Daphné Lorne (IFP). Le CLIP (Club ingénierie prospective énergie environnement, dirigé par et Michel Colombier (IDDRI)) s'intéresse aux questions « énergie- environnement » à long terme, par des comparatifs de filières technologiques, basés sur la construction de scénarios contrastés. Cette étude n'étant pas encore publiée (le rapport final sera remis 2008), ses résultats intermédiaires ne peuvent être intégralement communiqués, mais il est possible d'en donner quelques illustrations, et quelques commentaires généraux. Outre le niveau national, la situation du Bassin Adour Garonne (sud de la France) et celle du Bassin Seine Normandie (nord de la France) sont particulièrement étudiés.

L'étude construit quatre scénarios très contrastés de ressources agricoles pour la production de biocarburants (Lorne et Bonnet, 2008b) :

- Scénario 1A : 5 Mtep/an de biocarburants de première génération, sans évolution de technologie, avec les pratiques agricoles actuelles
- Scénario 1B : variante du 1A, introduisant une part de biogaz issu de résidus de cultures, dans le sud, et issu de cultures dédiées de luzerne, dans le nord : ce scénario est intensif, mais mobilise environ 30% de surface de moins que le S1A
- Scénario 2 : production de 20 Mtep de biocarburants (40% de la consommation totale carburants) sur 25% de la surface agricole utile (SAU), à partir de technologies de seconde génération (Biomass to liquid BtL, éthanol cellulosique) mobilisant des cultures spécifiques (cultures pérennes, céréales plante entière, ...), exploitées intensivement.
- Scénario 3 : mobilisant la même surface que le scénario 2, ce scénario vise prioritairement la protection des ressources en eau, en termes de quantité et de qualité. Sa production représente environ 14 Mtep.

	Production biocarburants sur SAU	Filières en jeux	Surfaces mobilisées	Ambiance de production agricole
Scénario 1A	5 Mtep*	Biodiesel Bioéthanol G1	2,6 Mha	Tendancielle
Scénario 1B	5 Mtep*	Biodiesel Bioéthanol G1 Biogaz	1,67 Mha	Tendancielle améliorant
Scénario 2	20 Mtep*	BtL Bioéthanol G2	6,9 Mha* (¼ SAU)	Productive (recherche des meilleurs rdt)
Scénario 3	~14 Mtep	BtL Bioéthanol G2	6,9 Mha* (¼ SAU)	Priorité environnementale

Tableau 7 – Caractéristiques principales des 4 scénarios de l'étude (Lorne et Bonnet, 2008b)

L'influence du déploiement des scénarios est traduite en termes de pression sur les ressources en eau :

- Pression en quantité (Bonnet et Lorne, 2008) : évaporation de la culture, prélèvement d'irrigation, déficit hydrique d'été,

- Pression en qualité : fuites d'azote
- Pression en qualité : phytosanitaires (Lorne et Bonnet, 2008a)

Les cultures type sont déterminées par une plante, une réserve en eau du sol, et un mode de conduite (irrigué, sec). Les bilans hydriques des cultures type sont déterminés sous un climat moyen pour les bassins étudiés. La validation de la démarche et des résultats recourt à un groupe d'experts agronomes. Philippe Debaeke et Eric Justes (INRA Toulouse) ont particulièrement contribué à améliorer les représentations, ainsi qu'à développer le traitement de l'azote.

La Figure 9 présente un exemple de profil de bilan hydrique, avec les valeurs des différents postes du bilan. La Figure 10 montre les valeurs obtenues pour quelques cultures dans les scénarios Seine Normandie. La Figure 11 donne un exemple de résultats provisoires pour la comparaison des scénarios selon le critère des prélèvements annuels d'irrigation. Le scénario 2 conduit à plus que doubler les prélèvements sur le bassin Adour Garonne. Le scénario 3 « protection des ressources », mobilisant des cultures peu irriguées, maintient voire réduit légèrement les prélèvements.

Des réflexions sur l'étude et des échanges avec les collègues agronomes sur l'étude depuis 2007, il ressort différents points :

- les cultures énergétiques, n'ayant pas la contrainte d'être comestibles, présentent pour certaines d'entre elles des « opportunités environnementales » (elles peuvent réclamer peu d'irrigation, être plus tolérantes aux stress hydriques, réclamer peu de produits phytosanitaires, etc.
- ces opportunités peuvent constituer de réelles chances d'engager des améliorations sur les impacts environnementaux locaux des cultures, ou au contraire accroître les pressions environnementales si des règles d'éco-conditionnalité ne sont pas mises en place
- les effets aux frontières ne sont pas pris en compte dans ce travail, qui modifie des assolements agricoles à l'intérieur du territoire français. Plusieurs grandes questions en matière de bioénergies ne sont pas abordées dans cette étude, mais devront l'être rapidement : questions des marchés internationaux/exportations, questions des concurrences entre bioénergies/matériaux/etc., questions de l'impact sur la production alimentaire, ... La focalisation actuelle du travail concerne les pressions sur l'eau.

Ce travail montre qu'en matière de déploiement des bioénergies, les choix des cultures, des technologies, mais aussi de façon d'introduire la protection de l'environnement dans les pratiques, seront déterminants sur les impacts. Une étude approfondie et opérationnelle des options envisagées est nécessaire pour préciser, et caractériser les impacts locaux de la décision au niveau des territoires, et en particulier introduire la relation pression – impact sur les ressources.

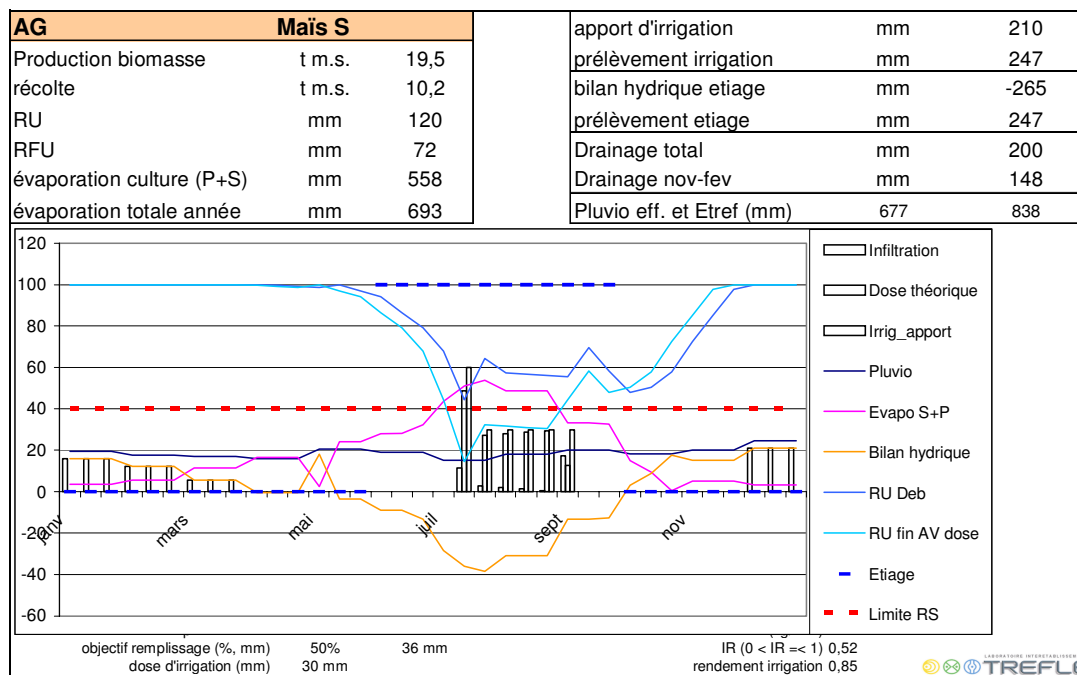


Figure 9 – Exemple de profil de bilan hydrique calculé pour une culture type (ici, le maïs irrigué en Adour Garonne sur sol moyennement profond) (Bonnet et al, 2008)

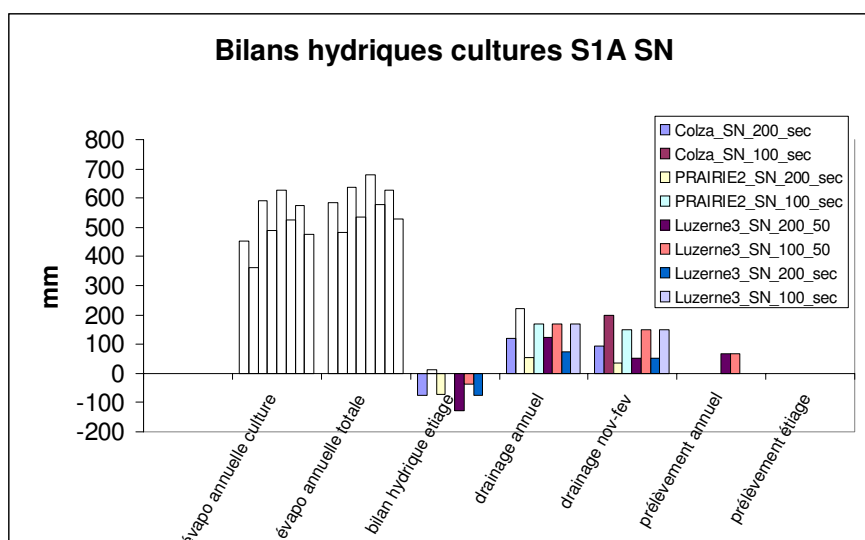


Figure 10 – Les postes du bilan hydrique obtenus pour quelques cultures type du scénario 1A sur le Bassin Seine Normandie

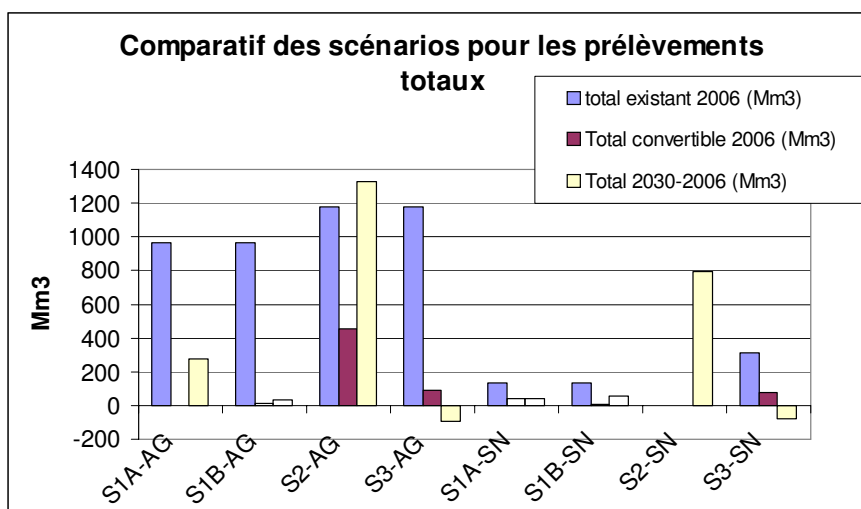


Figure 11 – Exemple de résultat obtenu pour les prélèvements annuels d'irrigation sur les 8 scénarios de l'étude : la surface existante désigne la fraction de SAU couverte en 2006 par les cultures concernées par l'étude (céréales, oléagineux, prairies, ...) ; la surface convertible désigne la fraction identifiée comme pouvant être convertie en biocarburants ; le total 2030-2006 désigne la différence entre l'état 2030 et l'état 2006. Par exemple, le S2AG conduit à ajouter un volume de prélèvements comparable aux prélèvements existant en 2006 sur l'ensemble des grandes cultures

3.2.4. Géothermie, problèmes de valorisation de l'eau, problèmes de stockage d'énergie

Les formes de mobilisation de l'énergie thermique du sol-sol, provenant du noyau terrestre, sont nombreuses et très dépendantes des situations locales. Le niveau thermique et le débit disponible constituent les principaux paramètres énergétiques de ces ouvrages. L'exploitation géothermique classique procède par doublet géothermique : forage de pompage de l'eau dans un puits production, récupération de la chaleur par échangeurs (et systèmes thermodynamiques lorsque le niveau thermique est peu élevé, en basse et très basse température). Parmi les situations remarquables : le Bassin Parisien, utilisant systématiquement des doublets géothermiques, les sites géothermiques (Islande, Nouvelle Zélande, ...), pour lesquels les caractéristiques du sous-sol sont telles que la production de hautes températures à débits élevés sont techniquement très accessibles.

Parmi les problématiques nécessitant une approche particulière « eau-énergie », on peut notamment signaler celles qui sont abordées par le groupe de travail « géothermie » constitué par l'Agence locale de l'énergie (ALE, 2008) :

- problématiques de valorisation de l'eau de « qualité potable » rejetée par les ouvrages sans doublet (la majorité des cas en Aquitaine), ou mise en place de réinjections
- amélioration de la récupération de chaleur sur les ouvrages existants : les pré-études montrent que l'énergie récupérée peut être augmentée d'un facteur 2 à 3, à prélèvement identique, selon la performance de la récupération
- projets nouveaux de réalimentation artificielle de nappes,
- questions et projets de stockage de chaleur intersaisonnier : tournés vers la maîtrise de l'énergie et du confort dans le bâtiment/les quartiers, ces projets visent à utiliser les capacités de stockage thermique du sous sol et des aquifères pour adoucir les pointes de chaleur d'été et réutiliser de la chaleur

en hiver. Globalement, le lissage des écarts thermiques saisonniers par une forte capacité de stockage peut permettre des réductions de consommation énergétique très significatives, jusqu'à trois quarts de la consommation typique. Les modes de transfert avec le sous-sol peuvent être advectifs-convectifs (avec pompage et réinjection d'eau), ou purement diffusifs (avec un maillage de sondes géothermiques communiquant la chaleur à la roche et à l'eau du sous-sol. Les niveaux thermiques atteints, avec des sollicitations cycliques, pouvant être élevés (80°C), les hydrogéologues s'interrogent sur les altérations possibles de la géochimie des eaux dans les aquifères mobilisés (cycle de précipitation – dissolution, colmatages possibles, ...). Les incertitudes qui pèsent sur l'exploitation de ces ouvrages portent également sur la rentabilité des installations, qui n'est bien connue qu'après plusieurs années de fonctionnement, bien que des tests soient disponibles pour caractériser la potentialité d'un sous-sol au stockage.

3.2.5. Hydroélectricité (haute chute, fil de l'eau) : coûts/bénéfices pour l'environnement local et global

- **Situation mondiale**

La situation mondiale de l'hydroélectricité est très contrastée entre les pays du Nord, fortement équipés, et les pays du Sud, en cours d'équipement.

Le développement de très grands barrages, en Inde ou en Chine par exemple, pose des questions environnementales, mais aussi sociales (déplacement et indemnisation des populations). Les arbitrages environnementaux sont difficiles. La question de l'accès à une énergie renouvelable, non émettrice de CO₂, doit entrer en ligne de compte (Tableau 8).

		Production potentielle d'hydroélectricité (TWh/an)	Consommation et émissions évitées (équivalent centrale thermique à charbon)		
			Mtep/an	MtC/an	MtCO2/an
Potentiel maximum	théorique	40.700	9.180	-	-
Potentiel technique		14.400	3.248	4.426	16.229
Potentiel économique		8.000	1.805	2.459	9.016
Production 2003		2.630	593	808	2.964
Marge économique d'accroissement		5.370	1.211	1.651	6.052

Tableau 8 - Les différents potentiels de production d'hydroélectricité, et les consommations énergétiques et émissions de CO₂ évitées correspondantes (adapté de données WEC, IHA, BP, OEDGEMP) (Bonnet et al., 2004)

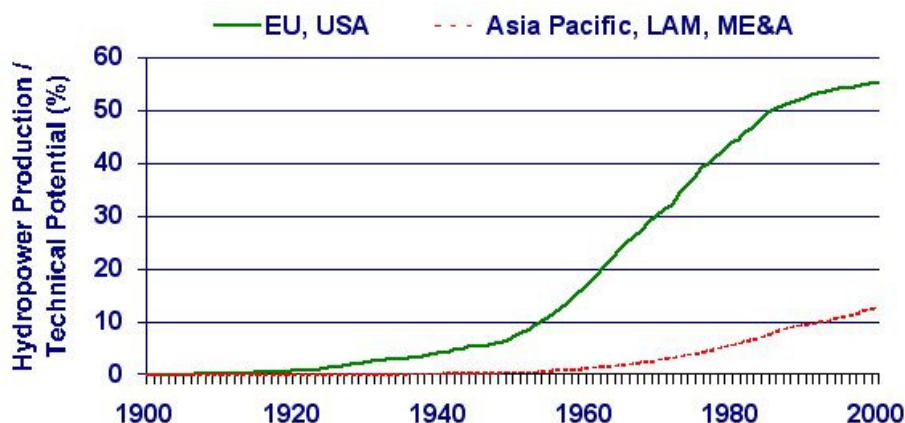


Figure 12 – Potentiel technique et production hydroélectrique, en évolution entre 1900 et 2000, pour l'Europe – Etats-Unis, et pour les pays d'Asie Pacifique, Amérique latine, Afrique et Moyen Orient (Bonnet et al., 2004)

• **Exemple de problématique locale : concurrence d'usages pour l'eau en vallée d'Ossau**

Le contexte hydroélectrique en France et en Europe est plutôt tourné vers l'accroissement de la prise en compte des

Ce travail a été conduit en relation avec David Capes (Creder, U. Bordeaux 4), dans le cadre d'une mission en vallée d'Ossau. La vallée d'Ossau est fortement équipée en barrages hydroélectriques de haute chute, très adaptés à la production d'électricité de pointe. D'autres activités sont présentes, notamment la pêche de loisir. La préservation du milieu est un aspect important de la remontée des poissons migrateurs (truite, saumon, ...) pour leur reproduction.

Les ouvrages hydroélectriques de haute chute (de 300 à 700 m environ dans la Vallée) présentent l'avantage, du point de vue de l'énergie, de produire une électricité renouvelable et quasiment non émettrice de CO₂. De plus, leur production en période de pointe évite le lancement de centrales d'appoint fonctionnant au fioul ou, le plus souvent en France, au charbon (c'est-à-dire fortement émetteurs de CO₂). Compte tenu de la hauteur de chute, les débits turbinés sont modérés. Ils ont nécessité toutefois la création de retenues en montagne, ou le plus souvent l'aménagement de lacs existants. En France, ces retenues sont en place, construites ou aménagées pendant toute la durée du XX^{ème} siècle.

Les problématiques environnementales locales sont en particulier :

- modification des hauteurs d'eau lors des turbinages (quelques dizaines de centimètres en sortie de Vallée, à Oloron)
- possibles exondations de frayères de migrateurs, conduisant à la perte d'une partie du potentiel de reproduction
- modification de la composition des eaux, lorsque l'eau des retenues présente des caractéristiques physiques et chimiques différentes

Une approche globale de la situation au confluent des gaves d'Aspe et d'Ossau, à Oloron, fait apparaître les impacts d'autres activités :

- rejets d'une partie d'effluents non épurés conduisant à une pollution (azote, phosphore et bactériologique),

- pollution due aux activités d'élevage très développées dans la vallée
- pollution toxique localisée due à la présence d'anciens sites industriels en haute vallée.

La façon de comparer l'influence des différentes pressions sur le fonctionnement de l'écosystème, et sur les différents usages de l'eau, reste à mettre au point, en incorporant les critères environnementaux globaux (énergie / GES).

Ce cas fait apparaître :

- les réelles difficultés d'arbitrage entre les impacts locaux et les impacts globaux, d'autant plus fortes que la nature et l'ampleur de ces impacts sont mal connues des différents acteurs,
- la nécessité de mettre en place des démarches de concertation entre acteurs. La rencontre entre exploitants hydroélectriques et représentants de pêcheurs, par exemple, permet aux différents acteurs de réfléchir une logique multi acteurs pour la ressource en eau
- le besoin d'exposer quantitativement et d'*objectiver* les enjeux, avantages et inconvénients des différentes activités
- l'intérêt d'une recherche de compromis environnementaux entre les acteurs, pouvant nécessiter des arbitrages locaux concertés.

Dans le domaine technique, les équipements hydroélectriques sont souvent anciens (30 – 100 ans) et peuvent présenter des marges d'amélioration (jusqu'à 7 à 8 points de rendement supplémentaires). Ces marges peuvent être mobilisées, soit pour accroître la production, soit pour maintenir la production en réduisant les volumes turbinés si le contexte réglementaire l'exige (Vigier, 2007).

- **Autres problématiques environnementales**

Non détaillées ici, d'autres problématiques environnementales sont à considérer : par exemple l'influence des ouvrages de « bas de bassin » (segmentation des cours d'eau, remontée/dévalaisons des migrants, etc).

3.2.6. Végétalisation et rafraîchissement évaporatif des ambiances

Dans le domaine des espaces bâtis, deux points de couplage potentiels peuvent être mis en évidence :

- le rafraîchissement évaporatif des ambiances, comme alternative aux systèmes thermodynamiques de conditionnement d'air. Présente dans certains pays du sud, cette solution est efficace dans les climats secs, généralement associés à des pays arides ou semi-arides. Les conditions de mise en œuvre sont souvent particulières, puisque ce type de système se développe sous un climat sec en présence d'une ressource en eau locale consommable. Dans un certain nombre de pays développés, on pourra envisager ce type de solutions tant qu'une ressource en eau suffisamment abondante le permet.
- La végétalisation des espaces, particulièrement importante pour améliorer la qualité de vie des espaces relativement denses. Il y a ici une difficulté, qui consiste sur des espaces assez confinés, à recréer des ambiances naturelles, et en même temps à contribuer au confort thermique (masques solaires, rafraîchissement par l'évapotranspiration), dans des situations où l'eau nécessaire est peu disponible. L'utilisation d'eau potable du réseau AEP ne va pas dans une logique

d'optimisation des ressources. Des solutions de récupération d'eau de pluie, nécessitant ici des volumes de stockage significatifs, peuvent être envisagées.

Une approche adaptée des ressources mobilisables semble intéressante à mettre en place, sur des cas type par exemple.

4. Quelles décisions, à quelles échelles, par quels acteurs ?

4.1. *Echelles, problèmes, solutions : particularités des problématiques « eau-énergie »*

La problématique eau-énergie est typiquement une problématique multi-échelles, les échelles de l'énergie (locales, régionales, globale) et celles de l'eau (principalement locales et régionales) s'imbriquant partiellement.

La lecture des échelles est à prendre en considération pour

- l'évaluation environnementale des situations (à toutes les échelles pertinentes),
- l'identification des niveaux de décision
- la recherche et la mise en œuvre des solutions
- la définition d'outils adaptés.

Comme l'illustrent certains exemples présentés (hydroélectricité, irrigation, certaines problématiques bioénergies,...), la résolution « complète » des plus complexes des problèmes eau énergie nécessite :

- une étape d'évaluation et de mise à plat des enjeux. Cette évaluation doit exprimer les enjeux aux différentes échelles, et donner les moyens d'apprécier ces enjeux
- une identification des acteurs et des schémas décisionnels dans les problématiques, lorsque ces problématiques le nécessitent
- une sensibilisation des acteurs aux enjeux, pour laquelle les évaluations environnementales doivent être vulgarisées, et souvent enrichies sur le plan technico-économique, et réciproquement une approche des orientations et des marges de manœuvre des acteurs
- une proposition opérationnelle de démarche de construction/ amélioration/ résolution (méthode, programme, animation, outils).

Souvent, la première étape préfigure les suivantes, en ce sens qu'elle permet d'identifier acteurs/problèmes/champ des possibles, sans qu'il y ait encore à formuler précisément les étapes.

Enfin, il faut garder en tête les nombreuses similitudes existant dans des problèmes de l'eau et de l'énergie. Pour prendre un exemple purement technique, l'analogie est forte entre l'étude d'un système local d'énergie renouvelable et celle d'un système de récupération d'eau de pluie (il s'agit en effet de deux systèmes décentralisés de production d'eau ou d'énergie) :

- étude technique spécifique sur site (le coût d'étude étant souvent important)
- fonctionnement en appoint/complémentarité avec la fourniture en réseau existante
- sensibilité aux caractéristiques locales (climatiques, ...)

- problématique de dimensionnement et de stockage
- possibilités de regroupements et de mutualisation
- contraintes d'investissement, temps de retour longs,...
- mécanismes de financement à spécifiques (subventions, etc.)

Pour autant, les interlocuteurs, les mécanismes, les financements, les bureaux d'étude, sont différents.

4.2. Quelles décisions, par quels acteurs ?

4.2.1. Gouvernements, Collectivités, Gestionnaires de la ressource

Une des clés dans les problématiques eau-énergie, au niveau de la décision, est d'intégrer les caractéristiques des deux mondes, celui de l'eau et celui de l'énergie. C'est également un enjeu opérationnel, au sens où la pratique de gestion du monde de l'eau, reposant sur la concertation des acteurs autour de la ressource, peut aider à appréhender certaines approches spécifiques dans le monde de l'énergie. L'approche de nombreux problèmes énergétiques nécessite une démarche de concertation entre acteurs ; cependant toutes les structures, programmes et outils ne sont pas en place comme dans le monde de l'eau. De même, les caractéristiques des filières, des problèmes et des enjeux énergétiques semblent parfois insuffisamment connues des acteurs de monde de l'eau.

Les décisions concrètes pourraient consister en une mise en place de critères d'évaluation et d'indicateurs de suivi croisés « eau-énergie ». La portée de ces critères devrait nécessairement être restreinte aux seuls domaines de pertinence des couplages, pour ne pas alourdir inutilement les programmes et les procédures. Une des premières tâches consisterait à lister les domaines d'interaction prioritaires pour lesquels ces évaluations seraient à mettre en place. En l'état, on peut penser que cette liste devrait inclure :

- le diagnostic énergétique dans les services de l'eau (Bonnet, 2007)
- la géothermie : le travail entrepris à l'initiative de l'Agence Locale de l'énergie, vise à définir un programme d'actions et conduira sans doute à définir des indicateurs de suivi.
- l'hydroélectricité : il s'agit d'un secteur sur lequel les équipements sont majoritairement en place, et que le renforcement de critères environnementaux sur l'eau (DCE, ...) conduit à réexaminer,
- les bioénergies : il s'agit d'un secteur prioritaire, en ce sens que les orientations et décisions ne sont pas encore prises, et que les orientations prises peuvent déterminer des niveaux d'impact extrêmement différents, allant d'un renforcement des impacts à l'amélioration de certains critères sur l'eau. Le champ est encore ouvert.

Pour les deux derniers, un programme de recherche et d'intégration de connaissances spécifique aux territoires concernés, en interaction avec des réseaux nationaux, serait une première étape indispensable. La combinaison de réflexions méthodologiques, d'états de l'art scientifiques, de sujets de recherche et d'innovation pointus, ainsi que d'approches du terrain, semblent être la façon la plus adaptée d'aborder une problématique complexe, d'une part, et de mobiliser efficacement les compétences disponibles, d'autre part.

A terme, il s'agit de définir des programmes territoriaux, les horizons étant différents selon la maturité et la complexité de la problématique abordée. Les territoires (région, département, bassin, ...) constituent en effet souvent l'échelle de gestion pertinente pour

les problèmes eau-énergie. La question des interlocuteurs et structures adaptées est ici très importante.

Il s'agit bien de favoriser des démarches de construction progressive dans des champs complexes. Les projets doivent avancer par étapes et, pour certains, intégrer les temps de découverte de nouveaux acteurs et les temps d'apprentissage et d'appropriation de problèmes nouveaux, avant d'envisager la construction de phases opérationnelles.

Parmi les autres recommandations :

Organiser, à la suite de manifestations internationales, des rencontres régulières et locales tels que des forums ou « rencontres eau-énergie ». Différents colloques ont été organisés des dernières années par les collectivités territoriales (colloques de prospective sur l'eau, Région Aquitaine à Bordeaux ; colloque de prospective sur l'eau, Agence de l'eau Adour Garonne à Toulouse).

Favoriser la formation des futurs techniciens et gestionnaires, par exemple en associant les formations universitaires à des ateliers spécifiques lors des rencontres.

Promouvoir la sensibilisation aux enjeux et l'information du public, qui constitue indéniablement un travail de fond, indispensable sur ces sujets car porteur de valeurs pédagogiques en environnement.

4.2.2. Opérateurs, bureaux d'étude

De façon générale, pour les opérateurs, il peut s'agir :

- d'acquérir ou de renforcer les capacités techniques pour ce type de problèmes
- d'intégrer des démarches d'évaluation environnementales transversales « rapides » dans différentes étapes de l'activité ou des projets (conception, conduite, ...)
- de renforcer sur ces sujets des interactions scientifiques « transversales »

Opérateurs de l'eau (syndicats, délégataires de service publics) :

- intégration des critères énergie / GES dans les études
- intégration des critères énergie / GES dans le suivi de fonctionnement
- mise en place d'une capacité de suivi énergie / GES
- capacité de diagnostic énergétique, interne ou externe

Opérateurs de l'énergie

Selon les opérateurs, la problématique « eau » diffère fortement.

Pour les électriciens (hydroélectricité), la réalisation d'un état des lieux environnemental des ouvrages dans la continuum du cours d'eau pourra fournir des éléments de cadrage utiles pour les futures évolutions des sites. Cela peut avoir son utilité pour les questions relatives aux débits réservés, aux relations avec les autres usagers des cours d'eau, etc. La question du rendement énergétique des équipements pourra être systématiquement examinée.

4.2.3. Usagers, grand public

Faire intervenir les interactions eau-énergie auprès du grand public suscite deux questions :

- l'intérêt : a priori, il pourrait porter principalement sur la sensibilisation aux enjeux environnementaux, et à l'attitude à tenir devant des problèmes imbriqués, dont les solutions nécessitent d'accroître sa culture environnementale et sa réflexion.
- La faisabilité : il est parfois difficile de communiquer/ sensibiliser sur un seul des aspects eau ou énergie, sans être trop réducteur sur la réalité des problèmes. Cela peut, dans certains cas, rendre la communication plus complexe. A l'inverse, sur certains exemples précis et illustratifs suscitant la curiosité (géothermie, hydroélectricité, bioénergies,...), évoquer les interactions peut contribuer à mieux expliquer le fonctionnement des systèmes, naturels ou techniques, les contraintes et les opportunités.

4.2.4. Monde académique

Par rapport à des problématiques croisées, complexes, qui prennent du sens, soit dans la production d'éléments d'aide à l'orientation dans des problématiques encore mal déterminées, soit dans des approches concrètes d'amélioration des situations et de résolution de problèmes, une attitude dans le monde académique pourrait être :

- de chercher à avoir une vue périphérique, prospective, et une capacité d'anticipation sur les problèmes « eau-énergie environnement ». Quelque peu antagoniste avec la spécialisation du chercheur, elle n'en demeure pas moins indispensable et relève bien du rôle des « académiques »,

- d'être prêts à répondre aux besoins, en termes de méthodes adaptées : pour cela, des réseaux académiques sont utiles, s'ils sont complétés par des interactions avec le « terrain » (opérateurs, gestionnaires, décideurs, ...)
- de mieux intégrer l'expertise comme pouvant faire partie des missions de la recherche
- de chercher à faire évoluer les dispositifs de formation : techniques d'évaluation environnementale dans les formations spécialisées, sensibilisation générale aux problématiques « eau, énergie, environnement » dès le début du cursus.

4.3. Quels outils ?

Les outils nécessaires, à imaginer, déjà partiellement en place, en cours de développement ou d'application, sont de différentes natures. La liste proposée n'est pas exhaustive.

4.3.1. Outils de diagnostic aux différentes échelles

Les outils de diagnostic sont conçus dans l'esprit d'une séquence audit – analyse – préconisation – suivi, ces outils concernent différents objets (systèmes, sites, territoires, bassins, ...). Ils peuvent être simplifiés (diagnostic rapide), ou détaillés (diagnostic technique).

- a) outils de diagnostic énergétique dans les services de l'eau
 - a. à l'échelle site : déjà décrits brièvement, ces outils permettent de produire des diagnostics d'installations. Ils sont à déployer en suivant les orientations données par une approche à l'échelon supérieur, grand patrimoine ou territoire. Ils permettent d'améliorer la performance technico-économique des ouvrages et des installations, de façon significative si l'approche à l'échelon supérieur a permis de détecter les sites prioritaires.
 - b. à l'échelle « patrimoine » (grand réseau, . Procédant par des méthodes rapides d'analyse utilisant des données globales et accessibles ex : comptages et facturations) et des méthodes de type benchmark (méthodes de ratios), elles permettent la détection des sites à diagnostiquer prioritairement. Elles constituent également une base utile l'analyse préalable des orientations de gestion.
 - c. à l'échelle territoire. Procédant par des méthodes similaires à celles de l'échelle patrimoine, elles diffèrent par la dimension territoriale, et par la multiplicité des acteurs et maîtres d'ouvrage. La vocation de ces outils est davantage de caractériser globalement le niveau de performance et les paramètres moyens sur le territoire, afin d'accompagner des politiques de suivi et des orientations de gestion, et d'accompagner des programmes de benchmark et d'amélioration. Pour les grands territoires, les dimensions statistiques et cartographiques de l'analyse peuvent produire des outils de suivi efficaces.

Brièvement décrits en 3.1.1, partiellement testés sur différentes situations, ces outils sont à encore à développer au stade opérationnel.

b) Outils de diagnostic énergétique des exploitations d'irrigation. Evoqués en 3.1.2, ces outils ont été conçus au Trefle (Goossens, 2005), testés (Goossens, 2005, Heredia, 2006) et développés (Heredia et al., 2008) au GRCETA-SFA en Aquitaine. Il est à noter que le cadre de demandes fortes du monde agricole, les autres volets de l'analyse

énergétique de sites (carburant, séchage, chauffage, ...) sont également à prendre en compte. Par ailleurs, dans ces approches, adjoindre une compétence agronomique aux approches énergétiques permettrait d'élargir la question des changements d'assolements, et de compléter les critères énergétiques par l'intégration d'autres pressions environnementales.

c) Outils et démarches de diagnostic adaptés à d'autres situations

Les autres situations pour lesquelles les démarches d'amélioration réclament une approche diagnostic de site sont nombreuses : il s'agit de développer une démarche simple et systématique de détection des sites prioritaires, une approche d'analyse des potentialités d'amélioration, et un instrument de suivi pouvant relever d'une logique publique. Par exemple, pour la géothermie, la détection peut porter sur des critères qualitatifs (présence de réinjection, d'une valorisation de l'eau, ...) et quantitatifs (volumes en jeu, efficacité de récupération de l'énergie, ...). Le diagnostic d'un site porte sur la conformité de l'ouvrage, sur ses caractéristiques, sur l'identification des voies d'amélioration, comprenant l'identification de valorisations potentielles de l'eau et les pré-études de faisabilité.

4.3.2. Outils opérationnels de prospective et de suivi

Ces outils d'évaluation prospectifs et de suivi aux grandes échelles sont conçus à des échelles de temps et d'espace assez larges. Basés sur des descriptions modèle et des approches rapides, ces outils peuvent être de conception relativement simple mais nécessiter des étapes de validation importantes. Ils sont plutôt adaptés à l'évaluation de constructions vraisemblables de la réalité, davantage qu'à la détermination d'un état environnemental détaillé aux petites échelles. Par nature, ces outils sont plutôt destinés :

- à la réalisation d'un état des lieux rapide
- à la production d'indicateurs synthétiques dans des questionnements prospectifs,
- etc.

Ces outils doivent, le plus souvent, être complétés par des approches plus fines des phénomènes qui sont moyennés et simplifiés pour les besoins de l'évaluation.

On peut mentionner, à partir des travaux cités, sans prétendre à l'exhaustivité :

- les représentations mises en œuvre dans l'étude générale des croisements eau-énergie, de type matrice – filières,
- les outils d'évaluation mis en œuvre dans l'évaluation des pressions des cultures bioénergies,
- les outils territoriaux globaux

4.3.3. Instruments de recherche, de production et d'amélioration de la connaissance en articulation avec les approches opérationnelles

Plusieurs programmes, réseaux scientifiques, structures, sont actifs en matière de mobilisation de la recherche sur des questionnements de société, à finalité d'expertise. L'intérêt de ces programmes est notamment de permettre une meilleure prise en compte dans les travaux de recherche des besoins « sociétaux ». Ces programmes, réseaux, groupes thématiques, rassemblent les « ressources naturelles » de l'expertise et on conçoit bien que, selon les modalités de mobilisation, on pourra obtenir différents types et différents niveaux de résultats.

4.4. Recommandations sectorielles

On pourra se référer aux remarques et recommandations formulées dans les parties correspondantes du document. Elles concernent en particulier :

- le secteur des bioénergies
- le secteur de l'hydroélectricité
- le secteur des services de l'eau
- le secteur de la géothermie,
- etc.

5. Quelques remarques en conclusion

Les interactions eau-énergie, telles qu'elles sont abordées ici, présentent un intérêt en tant que telles : elles posent, notamment, des problèmes techniques spécifiques, relevant des savoir-faire de l'ingénieur. Les savoir-faire de base de l'ingénieur (que ce dernier soit plutôt « énergie » ou plutôt « fluides », plutôt « systèmes techniques » ou « systèmes naturels », ou plutôt « biologie-agronomie »), nécessitent généralement d'être complétés pour traiter les problèmes « eau-énergie » aux différentes échelles de traitement. Les dimensions de la gouvernance, du jeu d'acteurs, de la gestion des concurrences d'usage, sont notamment à développer chez les énergéticiens-techniciens. Les champs d'application sont variés, et les ingénieurs formés, souvent par la pratique, à ce type de problèmes, peuvent contribuer à des démarches efficaces et originales.

Dans la dimension organisationnelle des problèmes, la perception technique des enjeux par les animateurs, gestionnaires, etc. doit être améliorée, afin de faciliter l'échange avec les techniciens, d'une part, et de mieux intégrer dans ses propres réflexions les caractères structurants de relations physiques et énergétiques des problèmes couplés. Enfin, les schémas institutionnels en place dans les différents pays (rôle de l'Etat, rôle des collectivités, rôle des institutions régionales,...) conditionnent les façons de gérer les problèmes. Entre une situation française et une situation espagnole, l'organisation de programmes et l'élaboration d'outils présenteront nécessairement des différences, compte tenu de particularités d'organisation institutionnelle, de réglementation, etc. La confrontation de ces différences, à l'occasion de programmes collaboratifs, est généralement source d'enrichissement et d'amélioration dans les modes de résolution des problèmes.

Mais l'étude de ces interactions présente également un autre intérêt, plus vaste : elle permet de reformuler certaines approches et certains problèmes. La dimension sociétale des problèmes d'environnement et de développement apparaît ici plus nettement.

Ainsi, la question du couplage eau-bioénergies constitue bien un des points clé de la problématique, en termes d'ordres de grandeur des impacts quantitatifs comme en termes de qualité des ressources. Les dimensions techniques, agronomiques, hydrologiques, écologiques, ... restent pour une large part à expliciter dans différents domaines : problématique phytosanitaires, outils d'évaluation et de suivi opérationnels, Les notions de productivité, d'options améliorantes pour l'environnement, de maîtrise de la pression phytosanitaire, sont parmi les avantages potentiels de certaines options bioénergies. Les notions de concurrence pour les sols, de pression sur les marchés mondiaux, d'accroissement de l'intensification agricole générale, de perte de biodiversité,

comptent parmi les questionnements urgents de la problématique. La question des bioénergies est trop complexe, et trop porteuse d'enjeux, pour être traitée en faisant l'économie d'une réflexion globale sur le système de mobilisation des biomasses. Elle ne peut s'appréhender complètement sans une confrontation au système agricole et alimentaire dans sa relation avec l'eau. Dans ce domaine, il est à croire, même si cette affirmation peut apparaître provocatrice, qu'en abordant la question « bioénergies » il y a lieu de s'interroger également sur l'efficacité générale du système alimentaire mondial, en particulier en termes de répartition des ressources.

Remerciements : Michel Combarnous, Michel Colombier, Benjamin Dessus, Xavier Goossens, Daphné Lorne,

Membres du groupe 6 'eau-energie du CGP, Jean Audouze, Groupe Groupe éco eau SAGE, Groupe géothermie ALE (Pdt. M. Feyrit), Groupe pollutions diffuses (resp Olivier Atteia), agronomes INRA ayant apporté leur expertise à l'étude biocarburants, membres du Copil de l'étude eau et bioénergies, membres du clip, Bruno de Grissac, Marc Valat, Olivier Atteia, M. Feyrit, DC, MH, MG

Travaux et études cités

Certaines données techniques sont reprises de travaux applicatifs de stagiaires ingénieurs énergéticiens de la formation de Master 2 « Energétique et développement ».

ALE, 2008 – Réunion GT géothermie profonde, Bordeaux, juillet 2008

ASTEE, 2007 – Congrès annuel de l'ASTEE, juin 2007, Barcelone

Bonnet, 1998

Bonnet et Combarnous, 2001

Macquart, 1999

Coupric et Poussel, 2007 – Diagnostic énergétique d'un réseau d'eau potable, Rapport de Master 1 « Energétique et développement », 20 p.

Minnei, 2008

Almansour et Bonnet, 2008

Bonnet, Ayong le Kama, Cai, 2004 -

Goossens 2005

Goossens et Bonnet, 2001

Goossens et Bonnet, 2003a - Outil d'évaluation des coûts – bénéfices dans les interactions couplées Eau – Energie : étude de cas de l'approvisionnement en eau de la ville de Jaipur, rapport d'étude pour le Commissariat Général au Plan, 41 p

Goossens et Bonnet, 2003b

Bonnet, Lorne, Navaro, Almansour, 2008 – Evaluation des besoins en eau des cultures type de l'étude CLIP, mai 2008

Lorne et Bonnet, 2008a – présentation au CP, 18 juillet 2008

Lorne et Bonnet, 2008b – Les 4 scénarios d'occupation des sols de l'étude CLIP

Bonnet, 2007 – non publié

Heredia, 2006 -

Heredia, Bonnet, Goossens, 2008 - Montoldre

Vigier, 2007, Potentialités techniques d'amélioration des centrales hydroélectriques de haute chute : centrales de la SHEMA en vallée d'Ossau, rapport de projet de Master 2 « énergétique et développement », 20 p.

Aubé D., 2000 - Optimisation énergétique du SIAEP de Vélaines, rapport de stage de DESS Energétique,

Pochat, 1999

Efremov, 1999

Navaro et Bruhat, 2006