



Projet INCO-WADEMED
Actes du Séminaire
Modernisation de l'Agriculture Irriguée
Rabat, du 19 au 23 avril 2004



Implications énergétiques de l'irrigation. La place de l'énergie dans la répartition des coûts de l'irrigation en Lot et Garonne

X. Goossens

*Laboratoire TREFLE - UMR ENSAM-ENSCPB Bordeaux 1 CNRS 8508, Esplanade des Arts et Métiers
33405 Talence Cedex, France*

E-mail : goossens@lept-ensam.u-bordeaux.fr

Résumé - Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un travail de recherche portant sur les couplages entre la consommation d'eau et la consommation d'énergie en irrigation. Les objectifs d'ensemble de ce travail portent sur l'analyse de l'eau et de l'énergie des systèmes d'irrigation (performance énergétique des systèmes, champs d'application, alternatives); sur la conception et la conduite optimale, et la mise au point d'actions à l'échelle de l'exploitation par une approche couplée de la maîtrise des demandes en eau et en énergie; sur le développement de moyens de suivi et de comparaison à plus grande échelle; et sur les apports d'une démarche multi-échelles de prospective territoriale. Afin de répondre aux deux premiers objectifs, une enquête a été réalisée en partenariat avec la chambre d'agriculture de Lot et Garonne, dont l'agriculture est très diversifiée (culture, ressource en eau, système d'irrigation). Cette enquête, portant sur un échantillon d'une vingtaine d'exploitations, a permis de recueillir les éléments de coût énergétique et financier et de préciser les déterminants du coût énergétique dans la pratique de l'agriculture irriguée pour le contexte considéré. L'analyse détaillée de l'énergie facturée à l'exploitant d'une part, et de l'énergie utile nécessaire au fonctionnement des systèmes d'autre part, a mis en évidence les marges de manœuvre technique de réduction de la facture énergétique de l'irrigation. Les résultats obtenus permettent d'envisager quelques perspectives pour le prolongement et l'élargissement de cette étude : identifier les informations les plus pertinentes et indispensables pour établir un état des lieux territorial et repérer les indicateurs permettant de cibler les exploitations où un audit énergétique plus détaillé semble nécessaire. L'utilisation effective par les exploitants de l'information produite et diffusée (chambre d'agriculture, association, ...) doit également être étudiée. Cela peut contribuer à définir un outil ou un service d'évaluation et d'amélioration énergétique applicable à différents contextes.

Mots clés : consommation d'eau, consommation d'énergie, enquête, exploitation agricole, facture énergétique, irrigation, vulgarisation, France Lot et Garonne.

1 Introduction

L'étude présentée s'inscrit dans le cadre d'un travail de recherche dont les objectifs sont d'évaluer les enjeux de la maîtrise de la demande en eau et en énergie pour l'irrigation et de proposer

des actions de réduction des consommations adaptées aux différents contextes. Ce travail débute avec le constat de l'accroissement de la dépendance énergétique de l'agriculture irriguée. Dans les zones fortement contraintes par le climat et la disponibilité de l'eau, le renforcement du couplage entre irrigation et énergie représente un enjeu significatif des stratégies d'approvisionnement alimentaire. Ce couplage permet également d'établir un lien entre ressource en eau et dimension économique, qui peut lui-même être utilisé comme un levier économique pour la maîtrise des ressources en eau.

L'étude porte sur l'évaluation des coûts de l'irrigation et de leur répartition dans les exploitations irriguées du Lot et Garonne, préoccupation permanente des exploitants agricoles. En effet, à l'échelle de l'exploitation, choisie comme échelle de référence de l'étude, l'efficacité économique est un critère décisif. Toutes les démarches de maîtrise des consommations d'eau et d'énergie devront donc être associées à une argumentation économique adaptée aux contraintes de l'exploitant. Il a fallu explorer l'évaluation des coûts simultanément par l'enquête et par un calcul fondé sur les caractéristiques techniques des exploitations. L'agriculture pratiquée en Lot et Garonne présente l'intérêt de la diversité (culture, ressource en eau, système d'irrigation). Une collaboration avec la Chambre d'agriculture du département a permis d'accéder à un échantillon de 40 exploitations parmi lesquelles 20 ont été visitées.

2 Description de l'étude

Les objectifs de l'étude sont de déterminer les coûts de l'irrigation et leur répartition d'une part et d'identifier des potentiels d'amélioration notamment de réduction de la facture énergétique d'autre part.

La démarche appliquée s'articule autour des trois points suivants : enquête, calcul des consommations d'énergie, identification des écarts.

2.1 Enquête

Il s'agit de déterminer les coûts réels de l'irrigation par une compilation de l'ensemble des factures d'eau, d'énergie, et d'investissements pour les infrastructures. Un deuxième volet de l'enquête porte sur la caractérisation technique des systèmes, des ressources en eau et des cultures.

Les champs du questionnaire sont regroupés de la façon suivante :

- identification des cultures : espèce, besoins en eau (nombre de doses moyen pour une saison, et volume d'une dose), et surface (pour chaque parcelle),
- caractéristiques techniques et investissements associés aux infrastructures (réseaux, pompes, systèmes de répartition de l'eau sur la parcelle, lac et réservoirs d'eau),
- caractéristiques de la ou des ressource(s) en eau mobilisée(s) (accessibilité, disponibilité). On prend notamment en compte le coût d'accès à la ressource en eau (redevance de l'agence de bassin, abonnement, consommation),
- détails de la facture énergétique (type de contrat, abonnement, consommation).

Une exploitation peut mobiliser plusieurs ressources en eau, utiliser plusieurs systèmes, pompes, réseaux et plusieurs contrats d'achat d'électricité. Afin de bien respecter l'affectation des dépenses aux différentes cultures, on attribue à chaque parcelle d'une exploitation une combinaison correspondant à l'infrastructure complète de mobilisation et de répartition de l'eau.

2.2 Calcul des consommations d'énergie

La connaissance des caractéristiques, des infrastructures et des volumes apportés permet de déterminer l'énergie utile requise pour chaque parcelle irriguée. L'énergie utile est l'énergie hydraulique nécessaire pour mobiliser les volumes d'eau concernés dans les conditions de débits et de pressions adaptées aux différents éléments fonctionnels des infrastructures d'irrigation.

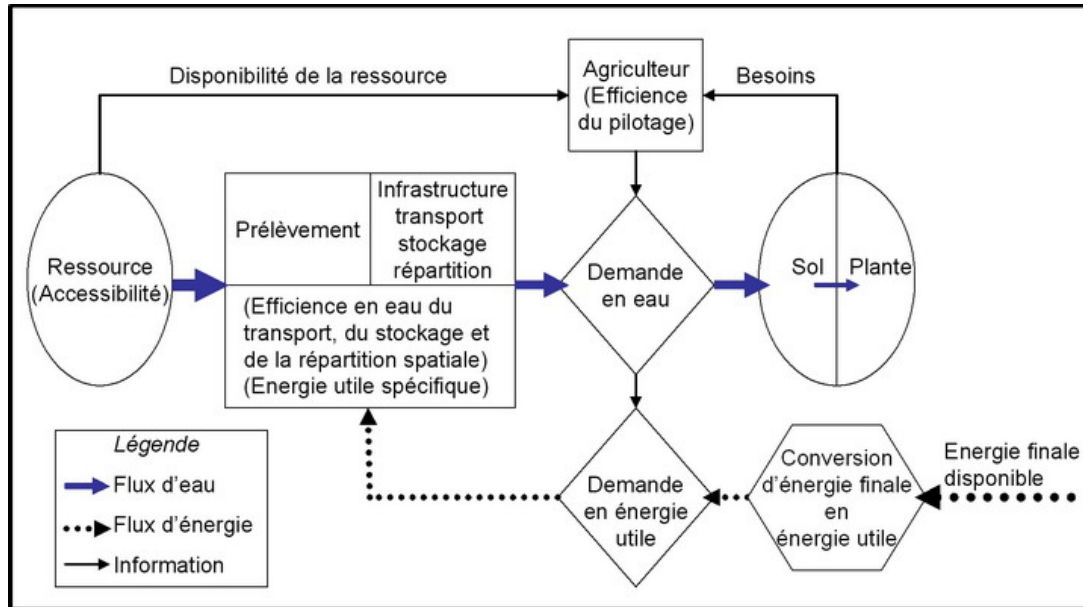


FIG. 1 – Implications des infrastructures, du couple demande – disponibilité des ressources, et de la finesse de gestion dans la demande en énergie de l'irrigation (Goossens, Bonnet, 2003).

La demande en énergie utile (E_{utile}) de chaque élément fonctionnel i est égale au travail mécanique nécessaire pour faire passer le volume d'eau considéré de l'entrée à la sortie de l'élément.

$$E_{\text{utile}}(\text{joule}) = M_e \cdot g \cdot h_i = \rho \cdot V \cdot g \cdot h_i \quad (1)$$

$$E_{\text{utile}}(\text{kWh}) = \frac{\rho \cdot V \cdot g \cdot h_i}{1000 \cdot 3600} \quad (2)$$

$$E_{\text{utile}}(\text{kWh}) = C \cdot V \cdot h_i \quad (3)$$

- M : masse d'eau traversant l'élément [kg]
- V_e : volume d'eau traversant l'élément [m^3]
- h_i : différence de hauteur manométrique entre l'entrée et la sortie de l'élément [m] (mètres de colonne d'eau)
- $g = 9,81 m \cdot s^{-2}$
- $\rho = 1000 kg \cdot m^{-3}$
- Coefficient $C = 2,725 \cdot 10^{-3} kWh \cdot m^{-4}$

L'énergie finale nécessaire dans des conditions de fonctionnement adaptées est l'énergie commerciale absorbée par le groupe de pompage pour produire l'énergie utile. L'énergie finale tient compte du rendement du pompage (moteur électrique et pompe) et d'une éventuelle conversion d'énergie (groupe électrogène). Enfin le coût énergétique est évalué en intégrant le type de contrat souscrit par l'exploitant, le coût de l'abonnement et le tarif du kWh électrique pour un contrat donné.

2.3 Identification des écarts

En comparant les résultats de l'enquête et ceux de l'évaluation des coûts énergétiques, on obtient les écarts entre les coûts d'une configuration adaptée et les coûts réels observés sur une exploitation. Cette démarche permet de déterminer les sources de dérive des coûts de l'irrigation sur les exploitations visitées.

3 Les principaux résultats de l'enquête

3.1 La structure des coûts

Les coûts de l'irrigation se répartissent entre investissements (accès et aménagement de la ressource, transport et répartition sur la parcelle) et frais de fonctionnement (coût de l'eau, de l'énergie et de la main-d'œuvre).

3.1.1 Les coûts d'investissement

Les deux principaux postes sur lesquels se répartissent les investissements sont les infrastructures de mobilisation des ressources et celles de répartition de l'eau sur la parcelle. Suivant les caractéristiques des ressources, le type de culture à irriguer et la surface des parcelles, les montants de ces investissements peuvent être assez variables.

Pour les investissements qui portent sur la mobilisation des ressources, l'origine de l'eau utilisée est un facteur déterminant. La nature de la ressource, qui est caractérisée par sa disponibilité et son accessibilité, conditionne le type d'infrastructures à mettre en œuvre pour assurer l'approvisionnement en eau de l'exploitation (tableaux 1 et 3).

TAB. 1 – Description des limitations physiques et des implications économiques associées aux différents types de ressource en eau.

	Limitations physiques			Implications Economiques	
	Disponibilité		Accessibilité	Investissement	Fonctionnement
Nappe superficielle	Débit, volume		Profondeur	Plusieurs points de captage	Plusieurs compteurs électriques
Cours d'eau	Débit en période d'étiage		distance	Réseau	Forfait réalimentation
Lac collinaire	Volume pluviométrique	plu-	Ressources Dif-fuses (temps et espace)	Captage stockage réseau	
Réseau collectif	Débit		Nombre de point d'accès (distance)	Réseau	Prix de la consommation et abonnement élevé

Au niveau des parcelles, le coût d'investissement dépend de la technique de répartition de l'eau utilisée (tableau 2). L'investissement augmente avec la densité de canalisation par unité de surface. Cet aspect est compensé par les coûts énergétiques qui diminuent lorsque la densité de canalisation augmente. En effet, plus le nombre de points de répartition de l'eau est faible, plus il faut d'énergie cinétique et donc de pression pour répartir l'eau de façon homogène sur la parcelle.

TAB. 2 – Systèmes d'irrigation adaptés au type de culture et à la surface des parcelles, fourchette d'investissement par type de système.

	< 5 ha	5 à 15 ha	15 à 50 ha	> 50 ha
Grandes cultures	C.I	C.I/E	E/R	R
Arboriculture	C.I/L	C.I/L	C.I/L	
Légumes	C.I/L	C.I/L/E	C.I/L/E	
Semences	C.I/E	C.I/E	C.I/E	
Tabac	C.I/E/L	C.I/E/L		

C.I : Couverture intégrale (65 à 170 €/ha/an) ;

E : Enrouleur (25 à 50 €/ha/an) ;

I : Irrigation localisée (35 à 300 €/ha/an) ;

R : Rampe

TAB. 3 – Fourchette de coûts d'investissement pour les infrastructures de mobilisation de la ressource en eau.

	Investissement	Durée de vie
Réseau enterré	€/m	Années
Canalisation (110 mm)	3 à 6	15 à 30
Tranchée	5	15 à 30
Pompe	€/unité	
De 6 à 15 KW	1200 à 4000	15 à 20
De 15 à 40 KW	3000 à 6000	15 à 20
Lac collinaire	€/1000 m ³	
35000 à 60000	500 à 900	>30

Bien que l'enquête permette de déterminer une fourchette des coûts d'investissement pour chaque élément des infrastructures, l'évaluation de la répartition des investissements dans les exploitations visitées reste un exercice délicat. En effet, les informations concernant les coûts d'investissement et la vétusté des infrastructures ne sont pas toujours disponibles.

3.1.2 Les frais de fonctionnement

Les frais de fonctionnement se répartissent essentiellement sur deux postes que sont l'eau et l'énergie. Il convient également de mentionner le temps passé à manipuler le matériel qui peut varier de manière significative en fonction du type de système et du niveau d'automatisation de ce dernier. Les coûts associés à la main-d'œuvre ne sont pas pris en compte dans la présente étude.

Les coûts d'accès à la ressource en eau se partagent entre la redevance de l'agence de bassin, et les éventuels coûts d'accès aux réseaux collectifs (abonnement et consommation) et aux cours d'eau réalimentés (forfait par hectare irrigué). Pour toutes les exploitations irriguées, sauf cas particulier¹, la redevance de l'agence de bassin est proportionnelle aux volumes prélevés (compteur d'eau) ou à leur estimation (forfait par hectare irrigué). Pour le bassin Adour-Garonne, le montant de cette redevance s'établit à 4,29 € pour 1 000 m³ (AEAG, 20032[1]). Dans le cas des réseaux collectifs, le coût de l'abonnement est dédié à l'amortissement des infrastructures de mobilisation et de transport de l'eau (réservoir, station de pompage, et réseau) et le coût de la consommation est dédié aux frais de fonctionnement (énergie et maintenance). Dans les exploitations, ces coûts ramenés à l'hectare irrigué sont variables (figure 2). Cela s'explique par la variabilité des conditions économiques d'accès aux réseaux, mais aussi par des différences dans l'utilisation des débits souscrits entre les exploitations.

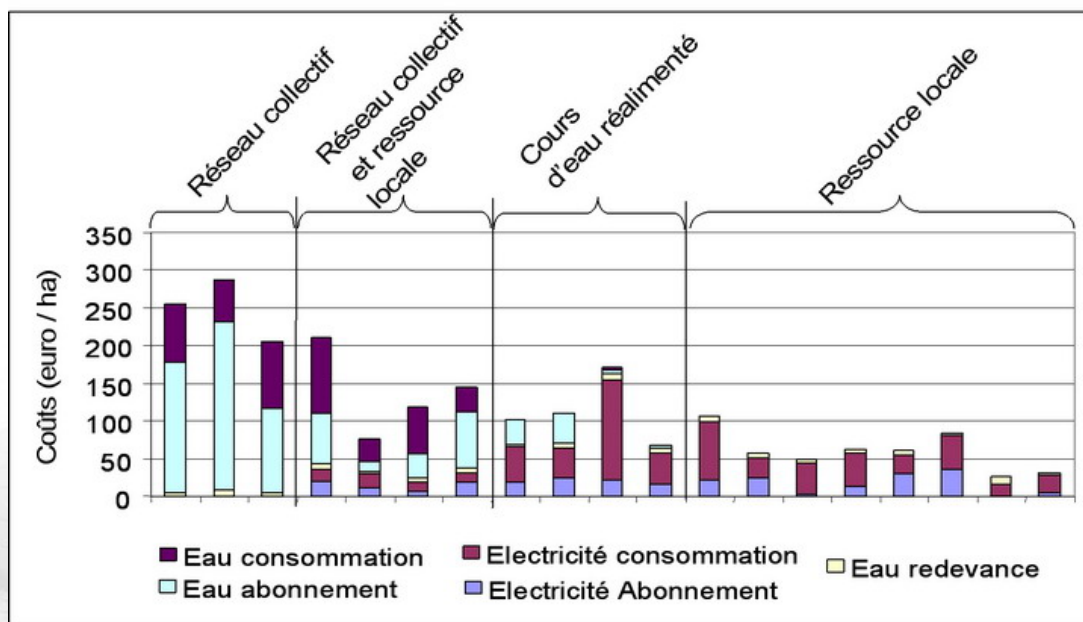


FIG. 2 – Répartition des frais de fonctionnement sur 19 exploitations du département du Lot-et-Garonne.

D'après la figure 3, les coûts de fonctionnement sont systématiquement plus élevés pour un

¹ Pour les prélèvements dans la nappe des sables des Landes, l'assiette de la redevance est calculée par l'application d'un coefficient 0,6 aux volumes mesurés. Pour les volumes captés dans les lacs collinaires construits sans aide de l'agence, l'assiette de la redevance est réduite de la capacité des retenues (AEAG, 2002[1]).

accès à l'eau via un réseau collectif. Il convient de nuancer cette remarque par le fait que les investissements pour le prélèvement et le transport sont intégrés dans le coût de l'eau alors qu'ils ne sont pas pris en compte pour une utilisation des ressources locales. L'irrigation des grandes cultures et des cultures de semences nécessite des investissements relativement faibles (environ 35 € par ha et par an) et présente des coûts énergétiques assez élevés (environ 70 € par ha et par an). Cette répartition est inverse pour l'arboriculture et pour les cultures de fruits et légumes. Enfin, pour l'irrigation du tabac, qui utilise les différents type de système, la répartition des coûts est intermédiaire entre les deux situations précédentes (grandes cultures, arboriculture).

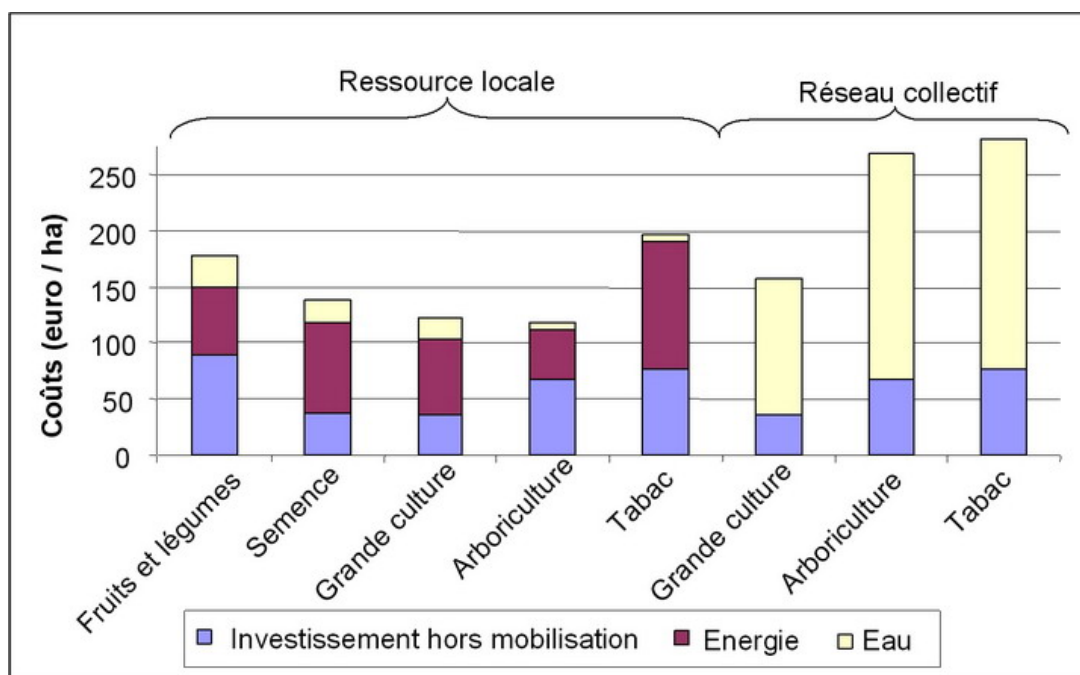


FIG. 3 – Répartition par type de culture des coûts moyens d'investissement et de fonctionnement au niveau de la parcelle irriguée. Dans cette figure, les réseaux, stations de pompage et les lacs ne sont pas pris en compte.

3.2 Les paramètres d'optimisation de la facture énergétique

Lorsque l'exploitant est l'opérateur du prélèvement dans la ressource, les coûts énergétiques de mobilisation et de répartition de l'eau sont directement à sa charge. Il peut alors décider des améliorations à faire en terme d'infrastructures en vue de réduire les coûts énergétiques. L'analyse des résultats de l'enquête et la décomposition des coûts énergétiques permet d'identifier quatre paramètres d'optimisation de réduction des coûts associés aux coûts énergétiques. Des cibles d'optimisation sont identifiées : les contrats avec le fournisseur d'électricité, les rendements du pompage, l'optimisation des débits et des pressions de fonctionnement des systèmes d'irrigation et la réduction des volumes d'eau mobilisés. Ce dernier facteur représente un potentiel de réduction des coûts énergétiques important.

3.2.1 Optimisation du contrat d'achat d'électricité

Pour les exploitations visitées les puissances mobilisées sont comprises entre 5 et 50 kW. Les tarifs EDF (compagnie Electricité de France) correspondant à cette gamme de puissance sont

les tarifs bleus, EJP, Tempo et le tarif jaune. On peut définir un type de contrat optimum en fonction de la puissance requise et de l'énergie finale électrique consommée par les pompes (figure 4). Le tarif de l'énergie (kWh électrique) varie en fonction du jour de l'année (jour bleu, blanc, rouge et jour d'effacement de la pointe d'appel de puissance - EJP) et de l'heure dans la journée (8 heures creuses et 16 heures pleines). Si on suppose que la probabilité d'utilisation des pompes est la même pendant les heures pleines et les heures creuses, on peut définir un prix moyen de l'électricité pour les différents jours types de la tarification. En outre l'irrigation n'étant pratiquée qu'en période estivale, et les tarifs blanc, rouge et EJP, étant réservés aux journées de fort appel de puissance nationale en hivers, on considère que pour l'usage irrigation, l'électricité n'est pas facturée à ces tarifs. En revanche lorsque les systèmes sont utilisés pour la protection contre le gel, la probabilité de consommation d'électricité aux tarifs les plus élevés augmente. L'analyse des données de l'enquête montre qu'environ 30 % des contrats EDF mériteraient d'être reconsidérés.

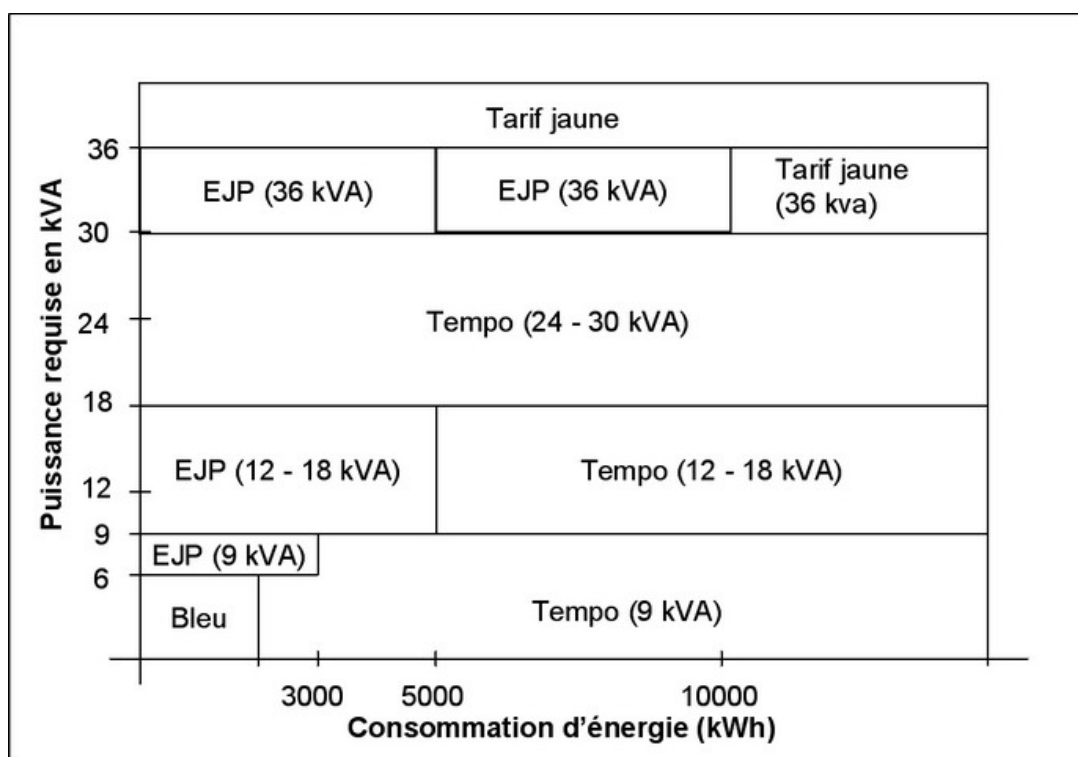


FIG. 4 – Contrats EDF optimum en fonction de la puissance requise et de la consommation d'énergie moyenne facturée par compteur (hypothèses : utilisation estivale exclusivement et à parts égales en heures pleines et en heures creuses).

3.2.2 Rendement du pompage

Le rendement énergétique des pompes, estimé en considérant les puissances nominales des pompes et les valeurs des débits et des pressions d'utilisation effective sur les exploitations, présente des variations de 25 à 70 %. Pour la gamme de puissance considérée, les rendements de pompe devraient être supérieurs à 50 %. Or, dans plus d'un tiers des cas, les rendements de pompes sont inférieurs à 40 %. Il s'agit d'une dérive importante qui implique des surcoûts significatifs. A titre d'exemple, le coût de la consommation d'électricité hors abonnement pour l'irrigation de 15 ha de maïs à raison de 1 500 m³ / ha avec un enrouleur (pression 8 bar) varie

entre 320 €, avec un rendement de 55 %, et 580 € avec un rendement de 30 % (soit un surcoût de 17 €/par ha et par an). Les raisons de telles dérives sont multiples. Les pompes peuvent être inadaptées aux caractéristiques de débit et de pression requis par les systèmes. Une pompe initialement prévue pour alimenter un enrouleur peut être utilisée pour un système d'irrigation par couverture intégrale. La vétusté du matériel peut aussi être à l'origine d'une baisse du rendement.

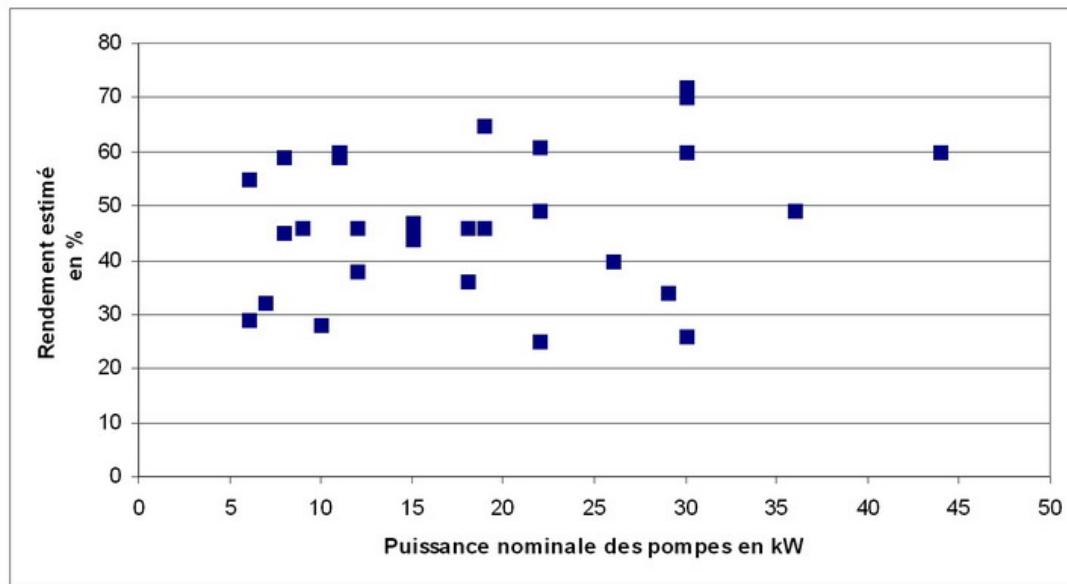


FIG. 5 – Le rendement estimé et la puissance nominale des 28 pompes répertoriées dans l'enquête.

3.2.3 Optimisation de la demande en énergie utile

Le choix des systèmes, le diamètre des buses et les modifications apportées aux réseaux déterminent la pression totale requise et par conséquent la demande en énergie utile des systèmes d'irrigation. L'élévation de 1 bar de la pression de fonctionnement d'un système d'irrigation conduit à un surcoût énergétique d'environ 2,5 €/par ha (pour 1 500 m³, avec un rendement de pour de 55 % et un coût de l'énergie de 0,035 € / kWh). Cependant, les démarches d'optimisation portant sur cet aspect sont délicates à mettre en œuvre dans le cas d'infrastructures existantes. Il conviendra donc de profiter des séquences d'investissement qui sont des périodes clés dans les stratégies d'exploitation pour lancer ce travail d'optimisation. Afin d'atteindre une bonne efficacité énergétique de son système d'irrigation, l'exploitant peut avoir recours à une évaluation énergétique des alternatives techniques envisagées.

3.2.4 Maîtrise des apports en eau

La consommation d'eau a une influence directe sur la consommation d'énergie de l'exploitation et donc sur le coût de l'irrigation. Depuis plusieurs années, la Chambre d'agriculture du Lot-et-Garonne procure aux exploitants des conseils techniques d'aide au pilotage de l'irrigation. Les deux principaux volets sont la publication de la réserve utile des sols visant à maîtriser les doses apportées au cours d'une irrigation et la réalisation d'un bulletin hebdomadaire adressé à tous les exploitants du département. Ce bulletin renseigne les exploitants sur l'évolution de l'état hydrique des sols pour différentes cultures et donne une tendance sur le pilotage des apports.

L'estimation du coût d'apport d'une dose marginale pour les différentes parcelles constitue un élément de décision économique supplémentaire au pilotage de l'irrigation. Ce coût marginal a été estimé pour chacune des parcelles irriguées de l'enquête. Le coût de l'apport d'une dose supplémentaire est la somme des coûts associés à la consommation d'énergie et à la consommation d'eau pour les parcelles considérées. Dans la mesure où les doses varient en fonction des cultures et des systèmes, il convient de les différencier. Pour les grandes cultures ce coût varie entre 5 et 29 €/ ha suivant les parcelles (figure 6). En moyenne, pour les grandes cultures considérées, l'apport d'une dose supplémentaire occasionne un surcoût de 17 % du coût moyen de fonctionnement de l'irrigation.

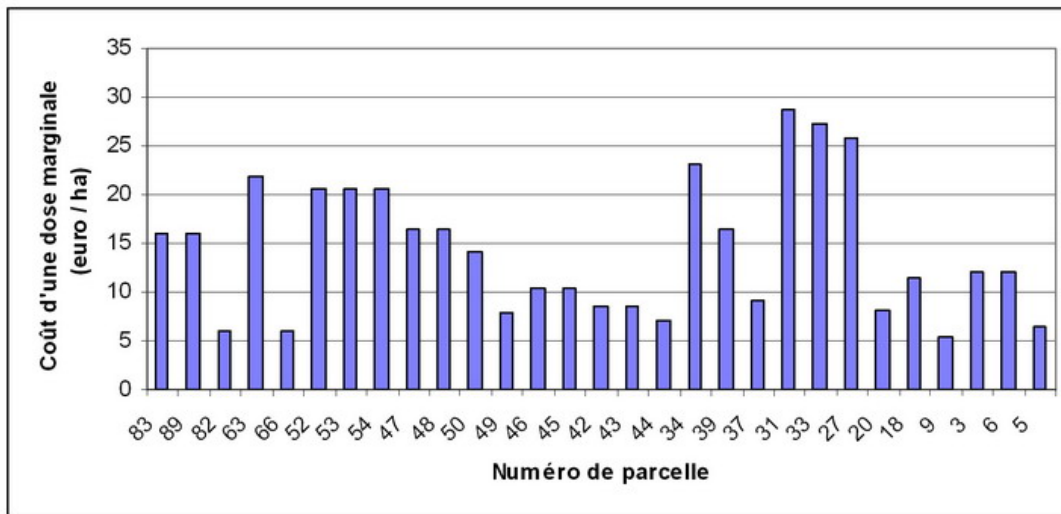


FIG. 6 – Coût de l'apport d'une dose marginale (consommation d'eau et d'électricité) sur l'ensemble des parcelles où sont pratiquées des grandes cultures.

4 Conclusion

Cette étude dans le département du Lot-et-Garonne montre que pour une zone où les techniques semblent bien maîtrisées, il existe encore plusieurs marges de réduction des coûts dans la pratique de l'irrigation. Cette optimisation des coûts passe par une approche intégrée des coûts d'investissement, des coûts de fonctionnement et des caractéristiques techniques associées.

Cette étude peut désormais être prolongée dans l'objectif de faire bénéficier les exploitants agricoles des résultats. L'enquête réalisée en Lot-et-Garonne est relativement coûteuse en temps. En outre, son caractère exploratoire a nécessité la collecte de nombreuses données au caractère plus ou moins redondant. A partir des cibles identifiées on peut envisager l'élaboration d'un questionnaire simplifié portant sur les principaux points à l'origine d'une dérive des coûts. Un tel questionnaire pourra être rempli directement par les exploitants et analysé de façon systématique. Il permettra notamment de repérer les exploitations où le potentiel d'économie est élevé et pour lesquelles une étude détaillée semble nécessaire. On peut également envisager la diffusion de fiches synthétiques d'aide à la conception visant à intégrer l'évolution des infrastructures, les coûts d'investissement et les coûts de fonctionnement. Un autre aspect à approfondir est l'établissement de valeurs critiques à partir desquelles les actions d'optimisation deviennent économiquement rentables. Pour y parvenir, il sera utile d'envisager une évaluation des coûts et des bénéfices associés à chaque type d'action.

La démarche utilisée dans le cadre de cette étude peut être appliquée à d'autres contextes. En

effet dans le cas du Lot-et-Garonne, l'accent a été mis sur la diversité des cultures, des ressources en eau et des systèmes d'irrigation. En revanche, il n'était pas nécessaire de considérer d'autre énergie finale que l'électricité. De plus, il a été admis que les apports en eau étaient efficaces. Pour d'autres contextes, particulièrement dans les pays du Sud, la réduction des coûts énergétiques par un travail sur le pilotage de l'irrigation et la mise en œuvre de techniques efficaces peut être importante. Dans certains cas, le choix de l'énergie finale pourra aussi représenter un potentiel d'économie intéressant pour les exploitants.

Remerciements

L'auteur tient à remercier Philippe Pace (Chambre d'agriculture du Lot-et-Garonne), Jean-François Bonnet (TREFLE / IDL) et les exploitants agricoles pour leur participation à cette étude. Ce travail a bénéficié du soutien de l'Institut de développement local d'Agen et d'une collaboration de la Chambre d'agriculture du Lot-et-Garonne. Il s'inscrit dans le cadre d'un travail de thèse soutenu par l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie).

Références

- [1] AEAG, 2002. Instauration de la redevance de captage d'eau et de la redevance de prélèvement net, délibération N° 2002/61 du conseil d'administration, Agence de l'Eau Adour Garonne.
- [2] EDF, 2003. Tarif jaune base en euro, service prix et risques marchés énergie. http://www.edf.fr/fichiers/pdf/20030704_Bareme_Jaune.pdf
- [3] EDF, 2003. Tarif bleu. Clients domestiques et agricoles, service prix et risques marchés énergie. http://www.edf.fr/download.php4?coe_i_id=303
- [4] EVANS R., SNEED R.E., HUNT J.H., 1996. Pumping plant performance evaluation, NCCES Publ. N° AG 425-6, <http://www.bae.ncsu.edu/programs/extension/evans/ag452-6.html>
- [5] GOOSSENS X., 2000. Impact des projets d'irrigation en termes de consommation énergétique et d'émission de gaz à effet de serre. Rapport pour le Fonds Français pour l'Environnement Mondial, Talence, Université Bordeaux 1, France, 62 p.
- [6] GOOSSENS X., BONNET J.F., 2003. Analyse des implications énergétiques de l'irrigation. *In* : Séminaire international " Technologies et méthodes modernes d'irrigation : recherche développement et essais ", Actes du séminaire CIID, Montpellier, France.