



FONDEMENTS THEORIQUES D'UNE TARIFICATION DE L'USAGE DE L'EAU. L'eau comme ressource semi-renouvelable

**Jean-Pierre Amigues, Pascal Favard,
Gérard Gaudet, Michel Moreaux**

**Groupe de Recherche en Economie Mathématique et Quantitative
(GREMAQ)**

Janvier 1994

Rapport au Commissariat Général du Plan

Le présent document constitue le rapport scientifique d'une recherche financée par le Commissariat Général du Plan (subvention n° 4944-1/66-01-MPPE002). Son contenu n'engage que la responsabilité de ses auteurs et non celle du GREMAQ. Le présent document est microfiché au Centre de Documentation de Sciences Humaines du C.N.R.S. Toute autre reproduction, même partielle, est subordonnée à l'accord des auteurs.

Table des Matières

1	La logique des rentes	15
1.1	Introduction	17
1.2	Le modèle	18
1.3	Le cas d'une population stationnaire	20
1.3.1	Le régime permanent lorsque la société ne dispose que d'une ressource renouvelable	21
1.3.2	La ressource renouvelable est abondante en régime permanent	22
1.3.3	La ressource renouvelable est une ressource rare en régime permanent	36
1.4	Les cas de populations non-stationnaires	44
1.4.1	Le sentier de consommation lorsque la population ne dispose que d'une ressource renouvelable	44
1.4.2	Une seule ressource non-renouvelable est disponible	45
1.4.3	Plusieurs ressources non-renouvelables sont disponibles	51
1.5	Généralisation à un nombre quelconque de ressources renouvelables	59
1.5.1	Le sentier de consommation lorsque plusieurs ressources renouvelables sont disponibles	59
1.5.2	Détermination des sentiers optimaux d'utilisation des ressources renouvelables et non-renouvelables	61
2	L'interaction stock-flux - Une première analyse	67
2.1	Introduction	69
2.2	Le modèle	70
2.3	Le cas de populations non croissantes	73
2.3.1	Le cas des populations stationnaires	73
2.3.2	Le cas des populations non croissantes	85
2.4	Le cas de populations croissantes	89
2.4.1	Remarques liminaires.	89
2.4.2	Le cas d'une fonction $V_i(t)$ croissante puis décroissante.	90
2.4.3	Le cas d'une fonction $V_0(t)$ décroissante, croissante puis décroissante	93
2.4.4	Signification des écarts entre prix de la ressource en stock et prix du flux	122

2.5 conclusion	123
Appendice	125
Notes	134
3 L'interaction stock-flux - Prise en compte des coûts	139
3.1 Introduction	141
3.2 Le modèle	142
3.3 Les cas de populations stationnaires	145
3.3.1 Le coût d'exploitation directe du flux est inférieur au coût d'exploitation	145
3.3.2 Le coût d'exploitation directe du flux est supérieur au coût d'exploitation en nappe	151
3.4 Les cas de populations décroissantes	180
3.4.1 Le coût d'exploitation directe du flux est inférieur au coût d'exploitation en nappe	180
3.4.2 Le coût d'exploitation directe du flux est supérieur au coût d'exploitation en nappe	185
3.5 Quelques cas de populations croissantes	192
3.5.1 Les conditions d'optimalité globale d'une politique d'exploitation myope partant de réserves nulles	193
3.5.2 La politique optimale partant de réserves nulles	201

Introduction

Parmi les ressources naturelles l'eau est une ressource qui présente un ensemble spécifique de caractéristiques dont certaines justifient le développement d'analyses théoriques nouvelles. Le présent rapport est un premier essai en ce sens.

Recensons d'abord ces caractéristiques, en insistant plus particulièrement sur l'eau douce.

1. C'est une ressource essentielle à toute forme de vie connue, pour laquelle on ne dispose d'aucun substitut.
2. Outre les aspects vitaux directs, c'est une ressource à usages **multiples**¹.
3. C'est une ressource globalement abondante mais très inégalement répartie.
4. C'est une ressource disponible sur forme de flux d'apports et sous forme de stocks, conséquence immédiate du cycle évaporation, précipitation, ruissellement, passage en nappe et en mer.
5. Le flux d'apport est généralement soumis à un cycle annuel dont le **profil** varie selon les zones géographiques considérées, **profil** annuel qui dans une zone donnée peut être considéré comme **aléatoire**².
6. Le ruissellement des flux dans les zones où ce ruissellement a lieu est fortement déterminé par la morphologie du terrain, d'où un découpage de l'espace en bassins versants qui délimite un premier système d'aires d'usages alternatifs de la ressource.
7. Le caractère aléatoire de la ressource pose non seulement un problème de régularisation des approvisionnements, mais dans certains cas également un problème de nuisances. Tout effort de régularisation a donc généralement des conséquences multiples, à l'intérieur d'un même bassin versant. Les usages multiples auxquels peuvent donner lieu ces aménagement sont soit complémentaires (**l'écrtage** des crues permet de mettre en réserve de l'eau qui sera turbinée ultérieurement) soient alternatifs (les **laches** opérées en période d'été pour augmenter la production agricole se font au détriment du turbinage d'hiver).
8. Une grande partie des stocks est constituée de stocks renouvelés en permanence par le flux d'apports, à des vitesses plus ou moins grandes (pour les ressources en lacs le temps de renouvellement défini comme le rapport du volume des réserves au

¹Sur la diversité de ces usages et leurs valeurs on pourra consulter D.G. Gibbons (1986).

²Il existe aussi des variations séculaires. Cf. par exemple la discussion par H.C. Fritts de l'étude de J. Bredchoeft dans E.A. Engelbert et A. Foley Scheuring (1984).

débit, est de **1** à 100 ans ; pour les réserves en nappes souterraines qui font l'objet de recharges la moyenne mondiale serait de l'ordre de **300 ans**)³. D'autres stocks peuvent être considérés comme des stocks non-renouvelables et doivent être analysés comme tels c'est-à-dire comme des mines.

9. La fonction réservoir de certaines nappes peut être irrémédiablement perdue si le niveau du stock est insuffisant (problèmes, par exemple, de **salinisation** progressive en cas de sur-exploitation). Donc pour le genre de nappes soumises à ce type d'irréversibilité le montant de la ressource en stock, indépendamment de tout problème de coûts, n'est pas la même selon que l'on veut ou non conserver à la nappe sa fonction de réservoir.

10. La géographie des nappes n'épouse pas nécessairement celle des ruissellements. Certaines grandes nappes renouvelables sont situées sous plusieurs bassins versants. Il est plus courant d'avoir plusieurs nappes dans un même bassin versant.

11. Le ruissellement créé des problèmes d'appropriabilité, d'où, en général, un régime juridique spécifique.

12. La **qualité**⁴ de la ressource est variable. Elle peut être affectée à différents stades du cycle : pollution des précipitations, pollution des ruissellements et des nappes. En prenant les précipitations comme point de départ d'un cycle, les dégradations à un certain stade se répercutent généralement au stade suivant. La pollution des flux implique généralement la pollution des stocks **et/ou** la détérioration d'autres parties de l'environnement (pluies acides par exemple, destruction d'éco-systèmes). Les problèmes d'**externalités** se posent donc avec une acuité particulière.

13. L'usage de la ressource implique généralement une déperdition en ce sens que tout prélèvement sur les flux d'apports **et/ou** les stocks prive les autres usages d'un certain pourcentage du montant prélevé (pertes pouvant s'élever à 90% du prélèvement dans certains usages). Pour réduire ce coefficient de déperdition l'usager doit supporter un coût additionnel.

14. L'usage d'une ressource de qualité plus faible impose souvent à l'usager soit un coût plus élevé, soit une perte d'utilité.

15. La qualité des rejets après usage est, en l'absence de traitement coûteux, plus faible que la qualité des prélèvements dont ils sont issus.

³Cf. R.G. Wetzel (1983) p.2. On sait avec quelles précautions il faut recevoir ce genre d'évaluations, qui doivent être interprétées comme des ordres de grandeur. Concernant l'hydrologie des nappes, il ne fait jamais oublier que c'est un domaine encore très mal connu.

⁴C'est évidemment pour la commodité de l'exposé que l'on parle sans plus de précision de "la" qualité de la ressource.

16. L'usage de la ressource n'est pas la seule cause (directe) de dégradation de sa qualité.

17. Indépendamment de tout problème de qualité, l'accès à la ressource (ruissellements, nappes, etc . . .) a toujours un coût. La géographie des nappes et des bassins versants et les coûts respectifs de prélèvement en surface et en nappe, les coûts de transferts inter-bassins, et enfin les coûts de traitement pour amélioration de la qualité déterminent des aires privilégiées de compétition d'usages.

18. L'observation des quantités prélevées et restituées et l'observation de la qualité des rejets est coûteuse (problèmes d'asymétrie d'information).

19. Dans un très grand nombre de zones ou bien la qualité de la ressource semble se dégrader (il existe heureusement des exceptions), ou bien la quantité disponible semble de plus en plus poser problème au regard des besoins. L'accroissement de la population et surtout la tendance de celle-ci à se concentrer sur des espaces de plus en plus réduits, l'amélioration de son confort, le développement de certaines formes d'agriculture et de l'industrie, exigent généralement une consommation accrue et moins bien répartie dans l'espace et accélèrent la dégradation de la qualité. Il s'agit de tendances lourdes, les situations étant localement très contrastées⁵.

Parmi ces caractéristiques, nombreuses sont celles qui ont déjà fait l'objet d'une analyse économique ou qui ont déjà donné lieu à la construction de modèles de recherche opérationnelle plus ou moins complexes. Ont été assez largement traités notamment les problèmes de pollution et d'externalités, les problèmes de régulation du cycle annuel des apports et les problèmes de lissage des aléas⁶. De même, les différentes institutions anciennes ou modernes, inventées pour résoudre les problèmes d'allocation ont été abondamment décrites et disséquées⁷ et l'efficacité de certains marchés, testée⁸.

Assez curieusement le problème des interactions entre eaux de ruissellement et réserves en nappes n'a été abordé que dans une optique de court terme d'amortissement

⁵Assez significative est la multiplication récente d'ouvrages aux titres plus ou moins alarmants dont les auteurs ne sont pas réputés faire dans le catastrophisme racoleur, cf. par exemple P.H. Gleick (1993), R. Clarke (1993). Dans un style plus écologiste militant du genre qu'affectionne le Worldwatch Institute, on pourra consulter S. Postel (1992).

⁶Cf. A.D. Esogbue (1989) pour un tour d'horizon.

⁷Pour les institutions anciennes on pensera par exemple au système mis en place en Andalousie et au tribunal de l'eau de Valence (on en trouvera une très bonne description dans E. Ostrom (1990), Chap. 3). On retrouve ce genre d'institutions dans de nombreuses régions (pour une analyse de ce genre de régulation en termes de jeux répétés on pourra consulter l'étude de F. Weissing et E. Ostrom, dans R. Selten (1991)). N'oublions pas non plus que certains auteurs ont cru pouvoir définir, à partir de la conjonction d'un problème de rareté de la ressource en eau et d'un certain développement des forces productives, un mode de production particulier : cf. K. Wittfogel (1957). Pour les institutions modernes on pourra consulter N. Spulber et A. Sabbaghi (1991). Pour la situation française cf. F. Salanié et A. Thomas (1994), 1ère partie du présent rapport, et Nicolazo (1989).

⁸cf. B.C. Saliba et D.P. Bush, (1987).

des fluctuations des apports. Les réserves en nappe ont alors une valeur tampon. Les modèles ainsi construits sont des modèles stationnaires, dans lesquels, en moyenne, la consommation nette est constante, ainsi que le niveau des réserves. Indépendamment de ce problème de court terme, se pose un problème de long terme d'utilisation optimale des flux d'apports et des réserves. A l'évidence dans de nombreuses zones l'intensité des prélèvements sur les réserves est supérieure au débit des apports à ces mêmes réserves, lesquels apports peuvent eux-mêmes dépendre des prélèvements effectués en surface. Si une telle situation ne peut perdurer, il ne s'ensuit pas nécessairement qu'elle soit sous-optimale. L'objet de la présente étude est de modéliser cette interaction d'une part et d'établir les conditions d'**optimalité** d'exploitation de ces ressources. Puisque ce système est un des systèmes **types**⁹ dans lesquels se déploient les phénomènes de pollution il convient d'abord d'en bien comprendre le mécanisme, la prise en compte des dégradations de la qualité de la ressource apparaissant, techniquement, comme une complexification du modèle de base.

L'étude comprend trois chapitres. Le plus simple est de partir d'un modèle relativement standard pour lequel on dispose déjà d'intuitions fortes. Au chapitre 1 on établit donc ce que devrait être l'usage optimal de ressources parfaitement **substituables** disponibles sous forme de flux renouvelés et de stocks non-renouvelables et on détermine les rentes associées, à l'optimum, à chacune de ces ressources supposées de coûts d'accès différentes. Le critère d'optimalité retenu est un critère classique de **maximisation** des sommes des utilités instantanées actualisées. L'utilité de chaque membre de la société dépend de sa consommation de ressource et du travail qu'il doit fournir. Chaque type de ressource nécessite, pour être mise à la disposition de la société, la fourniture d'un certain travail. On pose pour simplifier que le coût moyen en travail est constant. Mais ce coût moyen peut être différent pour chacun des flux et chacun des stocks disponibles. On envisage divers profils d'évolution **exogène** de la population. Les populations stationnaires constituent un point de repère particulièrement utile. Avec ce type de populations la consommation par tête optimale de ressource devrait d'abord décroître et finalement se stabiliser à un niveau stationnaire. Le sentier d'évolution optimale du travail par tête a un profil plus complexe, le mouvement n'étant pas monotone. La raison en est que l'actualisation veut qu'on exploite d'abord les réserves les moins coûteuses en travail. Par ailleurs les rentes en valeur **courante**¹⁰ des diverses ressources non-renouvelables doivent croître au taux de l'intérêt. Donc le coût marginal total d'accès aux ressources, c'est-à-dire la somme du coût direct augmenté de la rente, est croissant au cours du temps. En d'autres termes le rapport du prix implicite du loisir au prix de la consommation est croissant. La tendance est donc, le long d'un sentier optimal, de substituer progressivement l'un des biens à l'autre. Simultanément le niveau d'utilité individuel diminue. C'est le mouvement de fond pendant que l'on exploite une réserve d'un certain coût d'accès. Mais, le coût moyen d'accès à chaque réserve étant constant, si un certain stock doit être exploitée, il doit être aussi épuisé. Au cours

'L'autre système est celui du bassin versant. Il est clair que ces deux types ne sont découplés que pour la clarté de l'analyse.

¹⁰Exprimées en termes d'utilité par tête.

des phases de transition, lorsque l'on passe d'une réserve d'un certain coût d'accès à une réserve de coût d'accès plus élevé, le lissage du sentier de consommation impose temporairement un accroissement de la charge en travail". Enfin lorsque les réserves sont épuisées on est dans un régime stationnaire d'utilisation optimale des flux. Notons que les réserves qui doivent être exploitées sont les réserves de coûts moyens inférieurs à celui du flux de coût moyen d'accès le plus élevé parmi l'ensemble des flux qui sont exploités dans le régime stationnaire optimal, augmenté éventuellement d'une rente de rareté. Le long du sentier optimal d'exploitation des ressources le taux marginal de substitution de la consommation en loisir est d'abord croissant puis atteint un maximum auquel il reste lorsqu'est atteint le régime stationnaire. On a indiqué que le mouvement de la consommation était toujours décroissant pendant la phase d'approche du régime stationnaire, alors que celui du travail était constitué de phases de croissance et de décroissance. Il reste à souligner un dernier point. Selon l'abondance des diverses réserves initiales, le niveau initial d'effort par tête peut être inférieur ou supérieur au niveau du régime stationnaire finalement atteint, de sorte que la tendance générale du mouvement du travail est largement dépendante des conditions de départ. Lorsque la population fluctue le profil temporel du mouvement de substitution reste à peu près le même. Simplement le régime qui prévaut après épuisement des réserves n'est plus nécessairement en régime stationnaire.

On introduit au chapitre 2 le couplage nappe-surface en supposant que les coûts d'accès aux ressources sont nuls. Puisque tous les coûts sont nuls les rentes différentielles devraient disparaître, c'est-à-dire que les rentes associées aux diverses réserves devraient être les mêmes d'une part, les rentes associées aux divers flux devraient être les mêmes d'autre part, et enfin les rentes associées à chaque type de ressource devraient prendre la même valeur. Il en est bien ainsi lorsque la population est stationnaire ou décroissante. Mais si la population est croissante les deux types de rentes ne sont plus nécessairement les mêmes. C'est du au fait que dans ce cas les capacités de réserves naturelles des nappes peuvent être saturées. On peut donc être amené temporairement à n'exploiter que le flux d'apports, les stocks en nappe devant servir ultérieurement à faire face aux besoins d'une population plus nombreuse, d'où une divergence temporaire des rentes. Enfin au chapitre 3 on étudie un système avec couplage dans lequel les coûts des eaux de surface peuvent être différents du coût d'accès aux eaux en nappe, ce qui est généralement le cas en pratique. Dans ce cas même en régime démographique stationnaire on a à résoudre un problème intéressant de répartition des prélèvements entre surface et nappe, lorsque d'une part le coût de prélèvement en nappe est inférieur au coût de prélèvement en surface et d'autre part le passage en nappe s'accompagne d'une certaine déperdition de la ressource. Quand la population est croissante le même type de divergence entre rentes associées aux eaux de surface et rentes associées aux stocks en nappe peut apparaître.

"Sous l'hypothèse limite de constance de la désutilité marginale du travail le sentier de travail est discontinu. On passe instantanément d'une réserve à la suivante, i.e. il n'y a jamais exploitation simultanée de deux stocks. Au moment où l'on change de réserve exploitée la charge en travail augmente brutalement.

En France, comme dans la plupart des pays, la tarification de l'eau est basée sur les coûts de mise à disposition aux usagers, coûts entendus au sens large, c'est-à-dire incluant les coûts de traitement, d'adduction et d'entretien des réseaux de distributions. Une allocation intertemporelle correcte implique de prendre également en compte les rentes associées aux disponibilités variables des ressources en nappes et en flux. Une des ambitions de l'étude est de contribuer à la constitution du cadre d'analyse pertinent des modes de tarification optimaux de la ressource, qui doivent incorporer les valeurs imputées aux disponibilités des différentes sources d'approvisionnement en eau : flux renouvelables de surface, nappes rechargeables et nappes captives.

Lorsque les seules ressources disponibles sont constituées par des flux renouvelables et des nappes isolées de ces flux, la logique d'établissement des rentes optimales est une logique de rentes différentielles, les différentiels de rentes dépendant des différentiels de coûts d'accès. En revanche les niveaux de ces rentes dépendent étroitement des réserves disponibles et des volumes d'apports aux flux récupérables pour un niveau donné de la population. Si la population fluctue, ses mouvements conditionnent la détermination des sentiers d'exploitation optimaux et donc les niveaux de rentes imputés aux réserves disponibles, renouvelables ou non.

En présence de phénomènes de transfert surface-nappe, la gestion optimale conjointe des sources d'approvisionnement induit une logique de rentes beaucoup plus complexe. La raison en est que tout prélèvement sur le flux a un effet négatif sur les volumes de réalimentation des nappes et donc sur son coût d'opportunité, qui dépend de l'intensité des transferts mais également des volumes stockés en nappe.

On peut alors montrer que même si les ressources étaient exploitables sans coût, il conviendrait de les **tarifier** différemment selon leur nature. On peut également montrer que si la population est croissante, les rentes ne croissent pas forcément au taux de l'intérêt en valeur courante comme dans les modèles classiques de ressources non renouvelables. Enfin l'analyse conduit à distinguer la valeur de la ressource **in situ** et la valeur imputée à l'existence même de la nappe en tant que réservoir, ou en d'autres termes à la capacité de rétention des nappes renouvelables. Le modèle étudié permet de poser les principes du mode de calcul de cette valeur imputée aux capacités de stockage, un élément essentiel dans toute recherche d'indicateurs de bénéfices pour des projets d'aménagements visant à constituer des réserves, barrages ou **autres**¹².

L'existence de possibilités de transfert influe aussi fortement sur la logique d'exploitation des ressources au moindre coût. Lorsque l'exploitation du flux est plus coûteuse que l'exploitation des nappes, la possibilité de transférer une partie du flux en nappe permet de réduire le coût instantané de prélèvement. Mais si les pertes par transfert sont

¹²Il est bien connu que pour ce type de projet les coûts sont généralement assez bien maîtrisés, mais que la distribution des évolutions des demandes futures est très délicate à établir ainsi que l'appréciation des possibilités de substitution avec d'autres sources d'approvisionnement.

importantes, la prise en compte des conséquences de long terme des transferts peut conduire à inverser la règle de prélèvement qui s'imposerait à une optique de court terme, et donc à prélever sur le flux pendant au moins une certaine période, sans recourir aux transferts, bien qu'un tel choix puisse apparaître comme sous-optimal lorsqu'on se place dans une logique de gestion myope.