

# Annexes

- 154 ■ La place des milieux aquatiques dans les plans d'action de la Stratégie Nationale pour la Biodiversité (SNB)
- 158 ■ Indicateurs SNB et indicateurs DCE
- 159 ■ Eléments du débat entre économistes sur la distinction entre services et fonctions
- 160 ■ Classification des biens et services des zones humides
- 163 ■ Formalisation de l'approche coût-efficacité
- 165 ■ La mesure de la valeur de l'épuration des milieux

## La place des milieux aquatiques dans les plans d'action de la Stratégie Nationale pour la Biodiversité (SNB)

Seuls les plans d'action qui avaient un lien avec les milieux aquatiques et dont les objectifs ont été renforcés à partir de 2008 ont été pris en compte. Ces différents plans ont des niveaux de développement différents.

### Plan d'action du patrimoine naturel

L'objectif ce plan est de maintenir la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes ainsi que d'améliorer la trame écologique et d'informer les indicateurs pour le suivi. Les outils d'intervention utilisés par ce plan sont ceux qui structurent déjà la politique de conservation de la nature sur le territoire. Il s'agit du réseau Natura 2000, la création des aires protégées, la trame verte et bleue et la politique de préservation des espèces sauvages. Sur ces objets de la conservation, la question de gouvernance est au cœur des préoccupations, soit en termes d'instruments fiscaux/économiques/incitatifs et réglementaires soit en termes de connaissance et participation. En relation avec l'eau et les milieux aquatiques, les grandes infrastructures naturelles liées à l'eau sont prises en compte du fait de leur valeur écologique et de leur contribution au bien-être humain au sens du MEA. Il s'agit des estuaires, cours d'eau, vallées alluviales, couloirs aquatiques de migration, les zones humides, les bocages, les récifs coralliens et leurs écosystèmes associés. Le plan du patrimoine naturel est celui qui rend visible les liens entre la politique de l'eau et la politique de protection de la nature. Les milieux aquatiques (à l'instar des zones humides) et les bassins versants deviennent les espaces de concentration des outils d'intervention de l'Etat.

Il est à noter que la plupart des actions n'ont pas de calendrier défini. Il est indiqué uniquement la date de début des sous-actions (à partir de 2009 et 2010, par exemple).

Axes prioritaires	Nombre d'actions (2009-2010)	Actions en lien avec milieux aquatiques	Nom des sous-actions en lien avec les milieux aquatiques
Maintenir une bonne qualité écologique du territoire	4 actions et 30 sous-actions	Développer des plans spécifiques pour les infrastructures naturelles	Elaboration des orientations de la trame verte et bleue et accompagner leur mise en œuvre au niveau régional
			Cours d'eau et milieux aquatiques : application de la DCE (état des lieux des bassins hydrographiques, mise en place du programme de surveillance, définition des plans de gestion et des programmes de mesures, mise en œuvre de la loi sur l'eau)
			Zones humides : Poursuivre et renouveler la mise en œuvre du plan national des zones humides. Classer les zones humides d'importance internationale au titre de la Convention Ramsar
			Acquisition de 20.000 ha de zones humides contre artificialisation : favoriser l'achat par les agences de l'eau
			Bandes enherbées et zones tampons végétalisées d'au moins 5m le long des cours et des masses d'eau inscrites dans les documents d'urbanisme
			Extension des bandes enherbées le long de l'ensemble des cours d'eau dans les zones vulnérables en 2009 (4ème programme d'actions 2009-2013 en application de la directive "nitrates")
			Restaurer les continuités pour les écosystèmes d'eau douce : démantèlement des barrages de concessions hydroélectriques en cas de non renouvellement de l'exploitation dans le cadre d'une convention générale sur l'hydroélectricité durable en cohérence avec la restauration des milieux aquatiques (trame bleue)
			Littoral : mesures du CIADT littoral; stratégie à long terme du conservatoire
			Renforcer dès 2009 les moyens d'IFRECOR pour une action soutenue en faveur des récifs coralliens et de leurs écosystèmes associés
Accompagner l'essor de la gestion concertée du patrimoine naturel		Sauver les espèces sauvages menacées	Mise en place des plans nationaux d'action pour les espèces menacées en métropole et dans les DOM
Poursuivre la rénovation du droit et des outils économiques		Lutter contre les espèces envahissantes	Elaborer un plan espèces invasives terrestres et marines
	3 actions et 14 sous-actions	Consolider l'expertise et la gestion	Prévoir des mesures de reconstitution et de restauration pour les écosystèmes marins et côtiers dans les plans de gestion (SDAGE révisé) et les programmes des mesures qui seront établis à l'échelle d'un bassin hydrographique
	3 actions et 10 sous-actions	Rénover et compléter les dispositions juridiques	Continuité des écosystèmes d'eau douce : possibilité d'intervenir sur des ouvrages privés avec l'accord du propriétaire
		Renforcer l'efficacité de la police de la nature	Formaliser la doctrine de l'administration en matière de police de la nature, de la pêche et de l'eau. Création d'un pôle police de la nature dans les départements/rapprochements police de l'eau et police de la chasse. Renforcer les moyens humains de la police de la nature exercée par les établissements publics présents dans le département d'outre-mer (parcs nationaux, ONF, ONCFS et Onema) pour assurer une mise en œuvre efficace des réglementations

## Plan d'action agriculture

Le plan agriculture s'est attaché à démontrer la valeur/contribution des services écologiques de la diversité biologique pour les zones rurales et agricoles, tout en ayant un regard pragmatique sur les marges d'amélioration possibles de la profession agricole en termes de maintien ou de restauration de certaines infrastructures écologiques (ripisylves, haies, mares...) et de réduction des produits phytosanitaires (plan Ecophyto 2018) à hauteur de 50% des usages. La trame verte et bleue facilite la mise en œuvre d'outils contractuels, en particulier pour la mise en place des bandes végétalisées et l'élaboration des guides de bonnes pratiques pour la protection de la biodiversité remarquable. Les mesures agro-environnementales viennent en appui à la protection des zones humides.

Axes prioritaires	Nombre d'actions (2009-2010)	Actions en lien avec milieux aquatiques	Nom de l'action en lien avec les milieux aquatiques	Etat d'avancement
Territoires	5		Contribuer à la mise en œuvre de la trame verte et bleue pour restaurer les continuités écologiques	Les outils contractuels au service de la trame verte sont en cours de définition. Mise en œuvre de la TVB avec les partenaires locaux reste à construire
Pratiques agricoles	12	1	Encourager en accompagnant la contractualisation de baux environnementaux	A initier (développer l'information sur cet outil et décrire les contenus actuels des contrats des baux environnementaux)
		3	Recenser et valoriser les études relatives aux infrastructures agroécologiques pour la TVB	A engager
			Editer une brochure sur les zones tampons et la biodiversité	A éditer
Ecophyto	4		Développer des itinéraires agricoles économes en intrants et expérimentation sur 3 000 fermes	En cours avec une étude INRA
		4	Promouvoir des systèmes économes en intrants	Un guide de conception de systèmes économes est en cours de rédaction
			Développer et aménager les mesures agro-environnementales liées à la réduction de phytosanitaires	L'indicateur de fréquence de traitement (IFT) a été mis en place. En cours: suivre les engagements unitaires et proposer des ajustements
			Mettre en place d'un suivi des effets non intentionnels des phytosanitaires	A initier : la mise en place d'indicateurs d'impact sur la biodiversité ; établir un observatoire des résidus de pesticides et un réseau de surveillance des bioagresseurs et des effets non intentionnels
Ressources génétiques	6	0		
Suivi (observatoire évolution de la biodiversité en lien avec les pratiques agricoles)	11	1	Développer la contractualisation MAE dans les sites Natura 2000 et suivre leur évolution	En cours

## Plan d'action d'infrastructure, transports terrestres

Le lien le plus important avec les milieux aquatiques s'articule autour des obligations des études d'impact et d'incidence sur la biodiversité. Mais la mention dans le plan reste faible et nécessite plus de clarification des notions de compensation en particulier. La trame verte et eau est un levier important dans ce plan d'action. La phase 2008-2010 est dédiée à l'élaboration des guides, à la sensibilisation et à la formation.

Axes prioritaires	Nombre d'actions (2009-2010)	Actions en lien avec milieux aquatiques
La sensibilisation, l'information et la formation	4 actions	Renforcer la formation des services maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et exploitants d'infrastructures (SNCF, RFF, VNF, concessionnaires...) sur la préservation de la biodiversité, notamment sur la mise en place de la trame verte et bleue, et sur les travaux de génie écologique et paysagers ; pour l'Etat sont concernés en particulier les écoles et les organismes de formation initiale et continue
Le développement de partenariats et d'expertises	6 actions	Etablir des partenariats scientifiques avec des organismes de recherche et d'expertise (MNHN, Onema, ONCFS...)
		Encourager les démarches d'engagement volontaires des entreprises du BTP en faveur de la biodiversité
La connaissance de la biodiversité, la recherche scientifique et l'observation	6 actions	Prendre en compte le niveau d'avancement relatif à la trame verte et bleue
La préservation et la restauration d'habitats et de continuité écologiques.	4 actions	Eviter les zones à forts enjeux écologiques et paysagers dès les phases amont de la conception des projets et en cas d'impossibilité, prévoir mesures d'atténuation et/ou compensation adaptées
La préservation et la non-perturbation d'espèces		Évaluer l'effet des pratiques actuelles sur la biodiversité pour les adapter si nécessaire et promouvoir les pratiques favorables à la biodiversité. Il s'agit d'encourager les démarches de type « management environnemental » ; d'adapter les méthodes d'entretien et d'exploitation pour une meilleure préservation des habitats (références : cahiers d'habitats du MNHN) et des espèces dans les zones à fort enjeu écologique ; d'améliorer la transparence écologique des infrastructures sous la gestion du maître d'ouvrage (passages à grande et petite faune, passages mixtes, traitement des abords, clôtures faune dont le fonctionnement s'avère défectueux) en concertation avec tous les gestionnaires d'espaces hors emprises, en cohérence avec la trame verte et bleue

## Plan d'action de la mer (2009-2010)

Les grands axes stratégiques de ce plan se déclinent en plusieurs thématiques :

- amélioration de la prise en compte de la biodiversité par les politiques de la mer ;
- coordination des politiques publiques ;
- gestion de l'interface terre-mer ;
- amélioration des connaissances ;
- développement des aires protégées.

## Plan d'action urbanisme

Les outils de planification et d'aménagement du territoire doivent être compatibles avec les outils appliqués à la politique de l'eau (SDAGE, SAGE). Ce qui est très significatif dès lors qu'il s'agit d'évaluer les services des écosystèmes en jeu, de réduire les pressions et de lutter contre l'artificialisation des espaces et du paysage. La trame verte et bleue est centrale dans l'intégration de la biodiversité. En particulier sur la trame bleue, il s'agit d'assurer la continuité écologique et la restauration des cours d'eau, de maintenir la capacité d'épuration de l'eau grâce à l'action des micro-organismes et plantes qui absorbent les nutriments.

## Indicateurs SNB et indicateurs DCE

	Indicateurs SNB	Lien eau et milieu aquatique	Bilan 2004	Bilan 2008 (mi-parcours)
<b>Diversité génétique</b>	Nombre de variétés végétales et de races animales, enregistrées et certifiées aux fins de commercialisation, dans les principales catégories de plantes cultivées et d'animaux d'élevage			
<b>Diversité spécifique</b>	Indice des oiseaux communs			
	Richesse spécifique poissons	X	76 espèces représentées dont 24 ont été introduites, 2 ont disparues et 17 sont "en danger" ou "vulnérable"	7 espèces sur 34 d'amphibiens sont menacées
	Indice poissons de rivières	X	Non renseigné	Entre 2006-2007, entre 50% et 60% des peuplements sont en bon ou très bon état et 20% sont en mauvais état
	Statuts des espèces des listes rouges nationales	X	Les listes rouges des poissons d'eau douce métropolitaine. Pas de mention aux listes relatives aux amphibiens.	Voir les listes rouges sur les poissons et les amphibiens
<b>Diversité des habitats</b>	Etat de conservation des habitats d'intérêts communautaires des sites Natura 2000. Le nombre (et en surface) des aires protégées	X	Les zones humides (représentent entre 1,5 et 1,7 millions d'ha, soit 3% du territoire. Les eaux douces (gestion des hydrosystèmes et des ressources en eau)	Ce sont les récifs des Caraïbes de l'outre-mer qui sont les plus atteints (20-30% de mortalité des coraux par blanchissement). Entre 2003 et 2008, les aires protégées ont augmenté d'une manière générale. Les espaces en eau et les milieux aquatiques représentent 8% et 5% des arrêtés de biotopes, 10% et 8% des réserves naturelles nationales, 2% et 1% des parcs naturels régionaux et 10% et 16% des sites du conservatoire du littoral. Fortes avancées dans le domaine de la mer
<b>Trame écologique</b>	Carte de la diversité des types d'occupation du sol peu artificialisée au niveau local	X	On retrouvera les indicateurs pour les zones humides et les surface en eau	Entre 2000-2006, régression des zones humides
	Dominance dans le paysage des milieux peu artificialisés			Surfaces nettes artificialisées annuellement entre 2000-2006 au profit des surfaces en eau du fait de la transformation des zones d'extraction de granulats en plans d'eau au terme de leur exploitation
<b>Fonctionnement des écosystèmes</b>	Défoliation des arbres			
	Indices biologique global normalisé des cours d'eau	x	Indicateur de l'état des masses d'eau selon la DCE	Indicateur de "qualité de l'eau" renseigné depuis 2007 dans le cadre de la DCE (42,5% des masses d'eau sont en bon état) + pour les pesticides et phytosanitaires, les masses d'eau en moyen et mauvaise état sont 37% et 48%

## Éléments du débat entre économistes sur la distinction entre services et fonctions

De Groot et al. (2002) proposent de définir les fonctions des écosystèmes comme un « *subset of ecological processes and ecosystem structure [that] provide the goods and services that are valued by humans* ». Ils proposent à ce titre une liste de 32 fonctions, regroupées en quatre ensembles correspondant aux besoins fondamentaux de l'homme (régulation, habitat, production, information). On pourra remarquer que la plupart de ces intitulés de fonction ont été repris ultérieurement sous le terme de « services » par le MEA, d'où la critique déjà évoquée de cette classification. Pour distinguer fonctions et services, Wallace (2007) propose quant à lui une distinction « ontologique » entre les « fins » (les services) et les « moyens » (les fonctions et processus) : « *It is essential to clearly separate means (processes) and ends (services)* ».

L'intérêt d'introduire cette notion de fonction est cependant contesté par d'autres économistes pour plusieurs raisons :

- la distinction entre fonctions et processus écologiques est ténue et la capacité des économistes à définir le « *subset* » évoqué par De Groot est loin d'être assurée. Wallace (2007) considère donc que les deux notions sont synonymes et propose de n'utiliser que le terme de processus (*processes*) car « *parsimony of terms generally leads to greater clarity* » ;
- même si l'on réserve le terme « service » à des « produits finaux » des écosystèmes, on constate que, dans certains contextes, les fonctions peuvent devenir des services, et inversement. Par exemple, si quelqu'un collectait dans la nature des insectes utiles à la protection des cultures pour les vendre à des jardiniers amateurs, la « fonction » de protection des cultures deviendrait un « service » au sens de Boyde. Inversement, si l'on décide de classer en réserve biologique intégrale une forêt, le service de production de bois deviendrait localement une fonction supportant des activités touristiques ou éducatives ;
- toujours dans certains contextes, on peut avoir des fonctions qui ne constituent pas des produits finaux mais qui font l'objet d'échanges marchands. On peut citer par exemple la location de ruches pour la pollinisation des vergers ou le soutien de la société des eaux de Vittel à des « fonctions de production agricoles » préservant la qualité des eaux de source (Voir rapport du CAS p. 322).

La distinction ontologique proposée par Wallace apparaît donc, dans la pratique, très contingente. Costanza (2008) considère en particulier, en rappelant le diagramme général du MEA, que tous les services sont des moyens car « *the end or goals is sustainable well-being* ». Il considère donc plus adéquat de distinguer seulement des services finaux et des services intermédiaires et défend la définition large du MEA comme « *a good, appropriately broad and appropriately vague definition* » (Cette apologie du « vague » irrite quelque peu Wallace, qui rétorque en 2008 : « *I was uncomfortable with Costanza's acceptance of an « appropriately vague definition. (...) Should science accept vagueness ?* »).

On retrouve la même analyse que celle de Costanza chez Fisher et Turner (2008), qui réaffirment cependant la nécessité de distinguer services et bénéfiques, point de vue que nous avons défendu précédemment.

# Classification des biens et services des zones humides

## Classification de Brander *et al.*, 2006

Ecological function	Economic goods and services	Value type	Commonly used valuation method(s)
Flood and flow control	Flood protection	Indirect use	Replacement cost Market prices Opportunity cost
Storm buffering	Storm protection	Indirect use	Replacement cost Production function
Sediment retention	Storm protection	Indirect use	Replacement cost Production function
Groundwater recharge/discharge	Water supply	Indirect use	Production function, NFI Replacement cost
Water quality maintenance/nutrient	Improved water quality	Indirect use	CVM
Retention	Waste disposal	Direct use	Replacement cost
Habitat and nursery for plant and animal	Commercial fishing and hunting	Direct use	Market prices, NFI
Species	Recreational fishing and hunting Harvesting of natural materials Energy resources	Direct use Direct use	TCM, CVM Market prices Market prices
Biological diversity	Appreciation of species existence	Non-use	CVM
Micro-climate stabilization	Climate stabilization	Indirect use	Production function
Carbon sequestration	Reduced global warming	Indirect use	Replacement cost
Natural environment	Amenity Recreational activities Appreciation of uniqueness to culture/ heritage	Direct use Direct use Direct use	HP, CVM CVM, TCM CVM

## Classification proposée par Morardet (2009)

Services d'approvisionnement	
Alimentation	Production de poisson, gibier sauvage, fruits et grains
Eau douce	Stockage et rétention d'eau pour les usages domestiques, industriels, et agricole
Fibre et combustibles	Production de rondins, bois de feu, tourbe, fourrage, matériaux utilisés pour l'artisanat et l'art
Produits biochimiques	Extraction de produits biochimiques pour la production de médicaments, biocides, additifs alimentaires etc.
Ressources génétiques	matériel génétique utilisé pour la reproduction animale et végétale et les biotechnologies (exemple : résistance aux agents pathogènes des plantes, plantes ornementales etc.)
Services de régulation	
Régulation climatique	Source et puits pour les gaz à effet de serre ; influence locale et régionale sur les températures, précipitations, et autres processus climatiques. Stockage et rétention d'eau pour les usages domestiques, industriels, et agricole
Régulation hydrologique	Recharge et décharge des aquifères, stockage des précipitations et du ruissellement
Purification de l'eau et traitement des eaux usées	rétention, rétablissement et suppression des éléments nutritifs en excédents et des polluants
Régulation de l'érosion	Rétention des sols et des sédiments
Régulation des risques naturels	contrôle des inondations et protection contre les tempêtes
Pollinisation	Habitat pour les pollinisateurs
Services culturels	
Spirituels et inspiration	Source d'inspiration ; de nombreuses religions attachent des valeurs spirituelles et religieuses à certains aspects des zones humides
Récréation	Possibilités de nombreuses activités récréatives
Esthétique	De nombreuses personnes accordent une valeur esthétique à certains aspects des zones humides
Education	Possibilités de formation formelles et informelles
Services de soutien	
Formation des sols	Rétention des sédiments et accumulation de la matière organique
Cycle des éléments nutritifs	Stockage, recyclage, transformation, et acquisition des éléments nutritifs
Habitat pour les espèces animales	Habitats pour de nombreuses espèces, notamment les oiseaux migrateurs
Production primaire	Assimilation et accumulation de l'énergie et des nutriments par les organismes vivants
Photosynthèse	Production d'oxygène nécessaire à la plupart des êtres vivants
Cycle de l'eau	Circulation de l'eau essentielle pour les organismes vivants

## Liste des services des hydrosystèmes selon le MEA France

	Services quantifiés
Services d'approvisionnement	Fourniture d'eau à usage à usage domestique
	Production d'eau embouteillée (minérale et de source)
	Fourniture d'eau à usage à usage agricole
	Fourniture d'eau à usage industriel
Services de régulation	Fourniture d'eau pour la production d'énergie
	Crues et prévention des inondations
	Atténuation de l'effet des sécheresses
	Purification et traitement des déchets (autoépuration de l'eau)
Services à caractère social	Régulation des espèces nuisibles et envahissantes
	Paysages
	Valeur de la biodiversité et patrimoine
	Pêche de loisirs (mer et eau douce)
	Tourisme et loisirs de nature
	Développement des savoirs éducatifs

## Services rendus par les rivières, lacs, aquifères et zones humides selon EcoWhat-ACTéon (2009a)

<b>Fourniture d'eau</b>
Fourniture d'eau pour les usages domestiques
Eau industrielle, hydroélectricité, et autres usages industriels
Irrigation des cultures, parcs, golfs...
Aquaculture
<b>Biens autres que l'eau</b>
Poissons
Gibier d'eau
Coquillages
<b>Fourrures et peaux</b>
<b>Biens autres que l'eau (qui ne comportent pas un prélèvement dans la ressource)</b>
Régulation des inondations
Transport
Usages récréatifs (baignade, ...)
Dilution de la pollution et protection de la qualité de l'eau
Hydroélectricité
Habitat pour la faune sauvage
Fertilisation des sols
Accroissement de la valeur immobilière
Valeurs dites de « non-usage » (esthétique, etc.)

## Formalisation de l'approche coût-efficacité

Une formalisation simple du problème coût-efficacité est la suivante. Supposons que l'hydrosystème soit composé de  $I$  unités de gestion indicées par  $i, i = \{1, \dots, I\}$ . A chaque unité on envisage d'appliquer une mesure prise dans un ensemble  $M_i$  de mesures possibles pour l'unité  $i$ . Pour simplifier la présentation, supposons un gradient continu de mesures et donc l'ensemble des mesures possibles  $M_i$  est assimilable à un intervalle du type  $[\underline{m}_i, \bar{m}_i]$ . Notons  $C_i(m_i)$  le coût associé à la mesure  $m_i$  si elle est appliquée à l'unité  $i$ .

Une même mesure n'a pas nécessairement le même coût dans les différentes zones en raison de leurs spécificités écologiques. Ordonnons sans perte de généralité les mesures dans  $M_i$  pour que  $C_i(m_i)$  soit définie comme une fonction croissante de  $m_i$  dans  $M$ . En d'autres termes  $\underline{m}_i$  désigne la mesure la moins coûteuse et  $\bar{m}_i$  la mesure la plus coûteuse lorsqu'elles sont appliquées à l'unité  $i$ . Il en résulte que le coût marginal défini comme la dérivée du coût par rapport à la mesure est positif,  $dC_i(m_i)/dm_i > 0$ . Notons  $e_i$  l'état écologique de l'unité de gestion  $i$ ,  $e_i^0$  son état initial avant mise en œuvre du programme de mesures et  $\bar{e}_i$  le bon état à atteindre sur l'unité. Il est possible que l'état initial soit satisfaisant ou pas. Il est également possible que la mise en œuvre d'une mesure sur un site particulier ait des impacts induits sur d'autres sites en raison de leurs solidarités écologiques. Notons  $A_i(m)$ , où  $m = (m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_I)$  désigne un programme de mesures appliquée à l'ensemble des unités de gestion écologique composant l'hydrosystème, l'impact sur l'état écologique de l'unité  $i$  de la totalité du programme de mesures. Cette formulation permet de capturer l'existence d'effets induits d'une mesure appliquée à un site sur tout autre site. L'impact est mesuré en termes d'état écologique et là aussi, pour simplifier la présentation, on supposera que l'état est mesuré selon un gradient continu. De sorte que  $A_i(m_k)/\partial m_k$  désigne l'impact marginal sur l'état écologique de la zone  $i$  de la mesure  $m_k$  appliquée à la zone  $k$ . Il n'est d'ailleurs pas exclu a priori que cet impact induit soit négatif pour certains sites même s'il est probablement positif sur la zone à laquelle la mesure est appliquée.

L'approche coût-efficacité a pour but de déterminer le programme de mesures à entreprendre permettant d'atteindre le bon état sur tous les sites au moindre coût. Formellement il s'agit de résoudre le problème suivant :

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{i=1}^I C_i(m_i) \\ \text{s.c.} \quad & e_k^0 + A_k(m) \geq \bar{e}_k \quad k \in \{1, \dots, I\} \\ & \underline{m}_i \leq m_i \leq \bar{m}_i \quad i \in \{1, \dots, I\} \end{aligned}$$

Le Lagrangien associé à ce programme est le suivant :

$$L = - \sum_{i=1}^I C_i(m_i) + \sum_{k=1}^I \lambda_k \{A_k(m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_I) + e_k^0 - \bar{e}_k\} + \sum_{i=1}^I \{\alpha_i (m_i - \underline{m}_i) + \beta_i (\bar{m}_i - m_i)\}$$

Où  $\lambda_k$  désigne le multiplicateur de Lagrange associé à la contrainte d'atteinte du bon état écologique sur l'unité  $k$  tandis que  $\alpha_i$  et  $\beta_i$  désignent les multiplicateurs de Lagrange associés aux contraintes de faisabilité technique des mesures dans chaque zone  $i$ . Un programme de mesures coût-efficace satisfait :

$$\begin{aligned} \frac{dC_i(m_i)}{dm_i} &= \sum_{k=1}^I \lambda_k \frac{\partial A_k(m)}{\partial m_i} + \alpha_i - \beta_i & i \in \{1, \dots, I\} \\ \lambda_i (A_i(m) + e_i^0 - \bar{e}_i) &= 0 & \lambda_i \geq 0 & i \in \{1, \dots, I\} \\ \alpha_i (m_i - \underline{m}_i); \alpha_i &\geq 0 & \beta_i (\bar{m}_i - m_i) = 0, \beta_i \geq 0 & i \in \{1, \dots, I\} \end{aligned}$$

Négligeons pour simplifier les contraintes de faisabilité technique en les supposant satisfaites, c'est-à-dire que les mesures composant le programme solution ne butent pas sur les bornes de l'espace des mesures possibles. Alors les multiplicateurs correspondant sont tous nuls.

Les multiplicateurs  $\lambda_k$  s'interprètent comme l'équivalent monétaire (la « valeur » au sens économique donc) de la satisfaction de la contrainte de bon état sur le site  $k$ . La deuxième ligne des conditions précédentes nous signale que dans le cas où le programme de mesure améliorerait l'état écologique du site au-delà de ce qu'exige le bon état, alors la valeur de cet encore meilleur état serait nulle. Elle ne sera positive que pour les sites qui parviennent juste au bon état. L'objectif étant le bon état, engager des mesures coûteuses pour faire encore mieux que cet état serait du gaspillage par rapport à l'objectif et donc sans valeur. La première ligne indique de son côté que la meilleure mesure pour la zone  $i$  est celle qui égalise le coût marginal à la somme sur tous les sites de la valeur des améliorations d'état qu'elle permet.

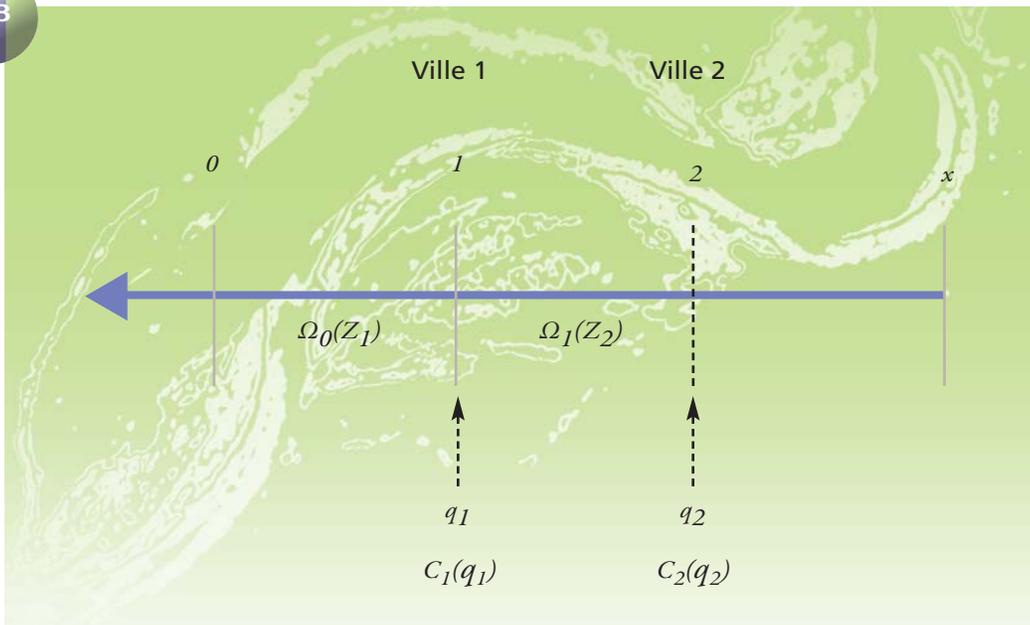
On voit toute l'importance de mesurer par programmation numérique les niveaux monétaires des multiplicateurs  $\lambda_k$ . La seule considération du coût d'une mesure sur un site ne permet pas de connaître la valeur économique de cette mesure en termes d'efficacité dans l'atteinte du bon état pour l'ensemble des sites potentiellement impactés par la mesure. C'est ce que permet d'identifier, zone par zone, le calcul des multiplicateurs. On appelle parfois ces multiplicateurs bénéfiques marginaux d'opportunité de l'amélioration de la zone  $k$ . En fait la méthode de calcul d'un programme coût-efficace que l'on vient de décrire sommairement est une illustration des méthodes de coûts d'opportunité précédemment décrites mais ici appliquée à la construction et à l'évaluation de la valeur économique d'un programme de mesures sur la base de son rendement coût-efficacité.

## La mesure de la valeur de l'épuration des milieux

Considérons un cours d'eau soumis à des rejets polluants. Pour fixer les idées, le cours d'eau est assimilé à une ligne orientée avec deux points intermédiaires de rejet, un point aval, par convention, le point  $0$ , et un point amont  $X$ , l'eau s'écoulant du point  $X$  vers le point  $0$ . Aux points 1 et 2 se situent deux agglomérations dont les rejets polluent le cours d'eau. On note  $q_x$  le volume des rejets transférés en rivière au point  $x$ ,  $C_x(q_x)$  le coût d'assainissement résultant d'un rejet net en rivière d'un montant  $q_x$  et  $c(q_x)$  la fonction de coût marginal où  $c(q_x)$  est négatif et croissant. En effet, plus l'effort de réduction des rejets s'accroît et plus le coût marginal devrait augmenter, impliquant qu'en tant de fonction des rejets polluants net, le coût marginal devrait décroître.

On note  $Z_x$  un indicateur de pollution en rivière mesuré au point  $x$ . L'objectif de l'Agence est de faire respecter une norme de pollution maximale  $\bar{Z}$  tout au long du cours d'eau. Pour simplifier on suppose qu'il n'y a pas de pollution provenant de l'amont du point 2, de sorte que :  $Z_2=q_2$  la pollution en rivière mesurée au point 2 est simplement les rejets de l'agglomération située en ce point. La pollution tend à s'accumuler lorsqu'on va de l'amont vers l'aval mais le milieu naturel est capable d'éliminer une fraction de cette pollution. Notons  $\Omega_x(Z_{x+1})$  la quantité de polluant éliminée par le milieu le long du tronçon  $[x, x+1]$  en tant que fonction des caractéristiques biologiques et morphologiques du tronçon et du volume de polluant en provenance de l'amont transitant par ce tronçon (Figure 88).

Figure 88



Éléments principaux du modèle simple à l'étude

La dynamique spatiale de la pollution est par conséquent donnée par :

$$z_x = q_x - \Omega_x(z_{x+1}) + z_{x+1}$$

L'objectif de l'agence est de mettre en place une politique de rejet permettant d'atteindre la norme  $\bar{z}$  au coût minimal. On est donc dans la logique d'un programme coût-efficacité au sens défini dans la troisième partie : l'objectif environnemental est donné et l'on cherche les moyens les moins coûteux de le réaliser.

Le milieu sur un tronçon quelconque ne peut éliminer davantage de pollution que la pollution entrante sur ce tronçon de sorte que nécessairement :  $\Omega_x(z_{x+1}) < z_{x+1}$ . Il en résulte que le niveau de pollution au mieux reste le même d'un point de rejet à l'autre ou augmente de l'amont vers l'aval. On en conclut que pour que la norme soit satisfaite en tout point du cours d'eau, il faut et il suffit qu'elle soit satisfaite à l'aval, c'est-à-dire au point 0. Tous les points situés en amont feront mieux que la norme. Le problème s'écrit donc formellement :

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & C_1(q_1) + C_2(q_2) \\ \text{s.c} \quad & z_x = q_x - \Omega_x(z_{x+1}) + z_{x+1} \quad x = 0, 1 \\ & z_0 \leq \bar{z} \end{aligned}$$

Pour résoudre ce problème, il convient d'appliquer le principe du maximum discret. Se rappelant que  $\text{Min}f(x) = -\text{Max}f(x)$  et réécrivant la dynamique spatiale de la pollution sous la forme :  $Z_{x+1} - Z_x = -q_x + \Omega_x(Z_{x+1})$ , le Hamiltonien associé à ce programme s'écrit :

$$H_x = -C_x(q_x) - C_2(q_2) + \lambda_{x+1}(-q_x + \Omega_x(z_{x+1}))$$

Avec la condition initiale :  $Z_0 = \bar{z}$ , faire mieux que la norme à l'aval n'ayant aucun intérêt économique. Les conditions d'optimalité sont alors les suivantes :

$$\begin{aligned} -c_x(q_x) &= \lambda_{x+1} \\ \lambda_{x+1} - \lambda_x &= -\lambda_{x+1} \frac{d\Omega_x(z_{x+1})}{dz_{x+1}} \end{aligned}$$

Pour saisir les implications économiques de ces formules, il est préférable d'étudier des cas particuliers. On va traiter successivement deux cas :

### 1. Le milieu n'épure pas la pollution : $\Omega_x(z_{x+1}) = 0$

Ce cas est surtout utile comme point de départ. On déduit de la deuxième condition de premier ordre que nécessairement :  $\lambda_0 = \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$  et donc que les coûts marginaux d'abattement doivent être égalisés en tout point de rejet. Pour fixer les idées supposons que la fonction de coût d'assainissement des rejets des collectivités soit la même en tout point et que la pollution brute à traiter soit aussi la même (les villes sont de taille identique). Plus précisément, postulons que cette fonction ait l'expression suivante :

$$C(q) = \frac{c}{2}(\bar{q} - q)^2$$

Où  $\bar{q}$  mesure le niveau des rejets bruts avant assainissement, supposé le même pour les deux agglomérations. On en déduit que le coût marginal est simplement :  $c(q) = -c(\bar{q} - q) = cq - c\bar{q} < 0$  puisque par construction les rejets nets sont inférieurs aux rejets bruts :  $q < \bar{q}$ . Il résulte alors de la première condition d'optimalité que :

$$\lambda = c\bar{q} - cq_1 = c\bar{q} - cq_2 \Rightarrow q_1 = q_2 = q$$

Il est clair que les villes étant supposées identiques, elles devront faire le même effort d'assainissement et donc émettre le même montant de rejets nets. Mais puisque  $Z_0 = q_1 + q_2 = 2q = \bar{Z}$  en l'absence d'épuration par le milieu, on voit que les rejets nets doivent être égaux à  $\bar{Z}/2$  et donc que  $\lambda = c(\bar{q} - \bar{z}/2)$ .

$\lambda$  s'interprète comme la contribution à la fonction objectif du programme d'une légère augmentation de la pollution présente dans le milieu ambiant. C'est donc de manière équivalente le coût marginal d'opportunité de la norme au sens où cette grandeur mesure l'augmentation de charges en termes de coûts d'assainissement que les agglomérations devraient supporter si l'on durcissait la norme de qualité de l'eau en rivière. En l'absence d'épuration naturelle, le problème revient simplement à partager en deux la charge du maintien de la norme entre les deux villes, partage à parts égales puisque les deux villes ont été posées identiques en taille et en performances d'assainissement. La capacité d'épuration par le milieu va profondément altérer cette logique. C'est ce que l'on va examiner maintenant.

## 2. Épuration naturelle proportionnelle à la pollution entrante

L'épuration naturelle est proportionnelle à la pollution entrante :  $\Omega_x(Z_{x+1}) = \partial_x Z_{x+1}$  avec  $\partial_x < 1$  mesurant le coefficient d'abattement sur le tronçon  $[x, x+1]$ , pas nécessairement le même d'un tronçon à l'autre pour exprimer le fait que les milieux peuvent être hétérogènes, un point sur lequel on a longuement insisté dans le corps de l'ouvrage. Le problème de cette formulation est qu'elle suppose que le milieu épure d'autant mieux qu'il est plus pollué, ce qui n'a guère de sens biologique.

Il résulte de l'équation définissant la dynamique spatiale de la valeur de la norme de qualité que : de sorte que :  $\lambda_{x+1} - \lambda_x = -\lambda_{x+1}\delta_x$ , d'où il résulte que :  $\lambda_x = (1 + \delta_x)\lambda_{x+1}$

$$\lambda_0 = (1 + \delta_0)\lambda_1 = (1 + \delta_0)(1 + \delta_1)\lambda_2$$

Et donc qu'à présent :  $\lambda_0 > \lambda_1 > \lambda_2$

A cause de l'épuration naturelle, il n'est plus possible de parler d'un coût d'opportunité associé à la contrainte de qualité devant s'appliquer à toute la rivière. Bien que la norme de pollution maximale soit uniforme sur le cours d'eau et donc indépendante de la localisation, sa « valeur », au sens du coût d'opportunité de la norme, varie tout au long du cours d'eau en fonction des processus d'épuration naturelle par le milieu aquatique. Dans le cas considéré, on obtient le résultat plus fort, qu'indépendamment de l'hétérogénéité des milieux, le coût d'opportunité augmente de l'amont vers l'aval.

On peut interpréter ainsi ce résultat. Considérons l'impact à la marge d'un accroissement de pollution. Si cet accroissement se produit très à l'amont, il bénéficiera de toute la chaîne de traitement naturel de la pollution jusqu'à l'aval, tandis que si cet accroissement se produit à l'aval, il ne bénéficiera que d'une chaîne de traitement plus courte. Il en résulte que toutes choses égales par ailleurs, un accroissement de pollution très en amont est moins grave que plus en aval, ce qui explique un coût d'opportunité de la pollution plus faible en amont qu'en aval et donc la croissance du coût d'opportunité de l'amont vers l'aval.

Dans le cas de villes identiques traité auparavant on voit que maintenant, la ville 1 doit fournir un effort d'assainissement supérieur à celui de la ville 2, c'est-à-dire supporter un coût d'assainissement supérieur de sorte que  $q_1 < q_2$ . Développons la récurrence spatiale de la pollution :

$$\begin{aligned} \bar{z} &= z_0 = (1 - \delta_0)z_1 \\ &= (1 - \delta_0)(q_1 + (1 - \delta_1)z_2) \\ &= (1 - \delta_0)(q_1 + (1 - \delta_1)q_2) \end{aligned}$$

La règle de partage des efforts induit à présent que :  $q_1 = (1-\partial) q_2$ . La ville 2 bénéficie d'un avantage lié à l'épuration naturelle sur le tronçon de rivière joignant les deux agglomérations.

En comparant le coût d'opportunité dans le modèle sans épuration aux coûts d'opportunité relatifs aux tronçons, on établit la valeur à la marge du service d'épuration rendu par les milieux naturels. Notons certains points importants. Même si les caractéristiques biophysiques des milieux étaient les mêmes, la valeur ainsi calculée du service n'a aucune raison d'être la même sur différents tronçons de rivière. En effet elle dépend évidemment des rejets dans le milieu qui sont variables. Deuxièmement, même si les rejets sont identiques en chaque point de rejet et que les milieux sont homogènes, la valeur du service n'a aucune raison d'être la même. En effet les milieux sont reliés par le cours d'eau et par conséquent leur position spatiale dans la chaîne de traitement de la pollution le long du cours d'eau influe sur la valeur du service qu'ils rendent. Dans l'exemple simple traité, il faut remarquer que la valeur du coût d'opportunité croît de manière multiplicative le long du cours d'eau alors que le processus de transfert de masses de contaminants est de nature additive. C'est une conséquence de l'hypothèse de proportionnalité. Il en résulte qu'additionner des coûts pour chaque tronçon pour en déduire une sorte de valeur « agrégée » à l'échelle d'un cours d'eau est en général dénué de sens.

