

Valise pédagogique

## Calcul socio-économique



Page laissée blanche intentionnellement

---

# Sommaire

<b>Chapitre 1 : Définir la situation de référence et harmoniser les hypothèses .....</b>	<b>6</b>
1 - Option de référence, option de projet et scénario de référence .....	7
<b>Chapitre 2 : Analyser les déplacements .....</b>	<b>12</b>
2 - Modélisation.....	13
3 - Coût généralisé et valeur du temps .....	22
4 - Trafic induit .....	31
5 - Accessibilité .....	36
<b>Chapitre 3 : Analyse coûts-avantages .....</b>	<b>44</b>
6 - L'analyse coûts-avantages : concepts et contexte d'utilisation .....	45
7 - Décomposition du bilan coûts-avantages et bilan par acteur.....	49
8 - Taux d'actualisation : utilisation .....	56
9 - Bilan coût avantages collectif actualisé et indicateurs complémentaires .....	60
10 - Coût d'opportunité des fonds publics .....	66
11 - Externalités : principes de valorisation.....	70
12 - Durée de vie optimale et valeur résiduelle .....	77
13 - Prise en compte de la fiabilité dans le coût du temps de transport .....	81
14 - Prise en compte du risque dans le calcul économique .....	85
<b>Glossaire .....</b>	<b>104</b>



## Préambule

Cette valise pédagogique vise à présenter les principaux concepts sous-jacents au calcul socio-économique appliqué au secteur des transports, et à en présenter la formulation mathématique.

Le calcul socio-économique peut se définir comme l'application pratique et simplifiée de la théorie micro-économique du bien-être, à l'analyse des décisions publiques. Le calcul économique vise à mesurer, sous certaines conditions, le surplus dégagé, pour la collectivité (ou pour une groupe d'acteurs économiques prédéfinis), par un projet, une décision, ou une politique publique. Le calcul économique ou calcul socio-économique s'intéresse à des effets dépassant les intérêts "privés" des agents économiques.

Le calcul économique a souvent pour synonymes : l'analyse coûts-avantage, le calcul du surplus collectif, le bilan coûts-avantages, l'analyse socio-économique, le bilan collectif monétarisé. Ces termes recouvrent, grosso-modo le même concept.

Le calcul économique vise à représenter par une valeur monétaire, la somme des effets d'une décision publique sur les agents présents dans une économie, y compris des effets qui ne se traduisent pas par des échanges marchands de biens et services (comme c'est le cas pour la plupart des effets des politiques de transports : gains de temps, de sécurité, de confort, impacts environnementaux, accessibilité). Le calcul économique dispose donc d'outils qui permettent, sous certaines conditions, d'attribuer une valeur monétaire à des effets dits "non marchands" (notamment environnementaux), en tentant de traduire l'impact de ces effets sur l'économie et/ou les comportements des agents.

Le calcul économique intègre également des outils permettant de traiter de la temporalité des décisions publiques et de leurs effets : il s'agit de la théorie de l'actualisation. C'est pourquoi l'on utilise parfois pour synonyme le terme "bilan actualisé". Le calcul économique intègre également des outils permettant de prendre en compte des aléas probabilisés sur les impacts des décisions publiques.

Le calcul économique est une "boîte à outils". Ceci signifie que le corpus commun qui est présenté dans ce document peut être adapté en fonction du sujet étudié, voire que de nouveaux outils peuvent être développés, pour des problématiques nouvelles ou complexes, dès lors qu'ils respectent les grands principes de la théorie du surplus collectif. A titre d'exemple, les problématiques de risque, ou d'emploi, ou d'exclusion sociale, ou d'accessibilité des territoires, font encore l'objet d'évolutions méthodologiques et de travaux théoriques et empiriques. Le calcul économique est en évolution constante. Le présent document ne présente pas tous les développements en cours, dont la richesse empêche de les référencer de façon synthétique dans un tel document.

Le calcul économique est un outil, et, en ce sens, il ne prétend pas à constituer le seul critère de décision publique. Le calcul économique, s'il présente le grand avantage de permettre de structurer les différents effets d'une politique publique, et de tenter de les agréger en évitant notamment des double-comptes, présente cependant également des limites. On peut, schématiquement, distinguer deux types de limites. En premier lieu, la valorisation monétaire de certains impacts des décisions publiques est encore difficile, par manque de données sur les comportements qui pourraient donner une information sur la valeur attribuée par les agents à ces impacts : c'est le cas en particulier pour certains effets de long terme, mais aussi pour les effets sociaux et sanitaires. Pour autant, les travaux sur ces valeurs monétaires sont en progrès constants, notamment au niveau international, ce qui permet peu à peu d'intégrer des valeurs monétaires de plus en plus consensuelles dans les calculs pratiques. Les impacts sanitaires et sur la biodiversité font partie de ces effets dont les travaux et techniques de valorisation monétaire progressent. En second lieu, certaines conditions théoriques de validité du calcul économique ne sont pas nécessairement satisfaites dans la pratique. Sans entrer dans le détail de ces fondements théoriques, on peut dire qu'une économie dans laquelle les comportements (prix et quantités de biens et services consommées) ne s'ajustent pas pour établir un équilibre (offre / demande), rend le calcul économique imparfait. Ces limites se rencontrent notamment là où les "marchés" connaissent certaines rigidités structurelles parfaitement explicables, ou bien ces marchés n'ont pas de sens : localisation territoriale des activités, emploi et formation, milieux naturels ou biens culturels remarquables.

Il importe donc toujours que l'utilisateur du calcul économique en connaisse et en mette en avant, de façon transparente, les limites et principaux facteurs d'incertitude. La formulation relativement simple du calcul économique permet toujours de faire des tests de sensibilité ou de travailler sur des fourchettes ou d'utiliser différentes valeurs issues de travaux ou d'approches différentes : sans pour autant "noyer" le calcul économique dans une foison de résultats, il serait dommage de se priver de la possibilité de tels calculs variantiels : cette attitude de transparence, plutôt que de fragiliser le calcul économique, peut le conforter.

Dans cet ordre d'idées, le présent document n'a pas vocation à présenter de façon prescriptive ni la formulation du calcul économique, ni son domaine d'emploi, ni les valeurs utilisées pour certains paramètres déterminants (valeur du temps, taux d'actualisation,...). Les documents de référence sur l'évaluation du Ministère ont vocation à présenter les valeurs des paramètres, le domaine d'emploi, la présentation des résultats et l'articulation avec d'autres critères ou approches d'évaluation. Le présent document, à vocation pédagogique, ne se substitue donc aucunement à ces documents de référence à vocation plus prescriptive. En cas de doute dans l'interprétation de ces différents types de documents (qui sont tous appelés à évoluer), l'application pour l'évaluation des projets et politiques du Ministère doit toujours se référer aux documents prescriptifs en vigueur.

Le présent document est organisé en trois parties :

- la première partie insiste sur le besoin de bien définir la situation de référence et la situation de projet : cette recommandation méthodologique n'est pas spécifique à l'application du calcul socio-économique, mais elle prend toute son importance dans la mesure où celui-ci vise à une quantification et une valorisation des impacts, qui est en général très liée à la situation de référence ;
- la deuxième partie présente l'analyse de la demande de transports dans le cadre plus général de l'analyse socio-économique, en introduisant notamment l'importance de la valeur du temps et des autres paramètres des choix des usagers (confort, fiabilité, prix et coûts), à la fois dans l'analyse de la demande, et dans celle du surplus collectif ;
- la troisième partie présente les différentes étapes et les principaux outils d'usage courant dans le calcul socio-économique ; cette partie n'aborde pas les questions dont les développements méthodologiques sont encore embryonnaires ou controversés dans le secteur des transports, principalement quant aux effets sur l'accessibilité, l'emploi et l'inclusion sociale ; dans le même ordre d'idées, cette partie n'approfondit pas les questions pratiques liées à la monétarisation des effets externes (principalement environnementaux), mais se limite aux concepts généraux et génériques aux différents types d'impacts.

En résumé, ce guide vise à permettre au lecteur d'acquérir les concepts essentiels et de comprendre les méthodologies existantes du calcul économique, en les illustrant sur les projets de transport interurbain. L'objectif est notamment que les chargés d'études puissent appliquer le calcul économique en étant conscients de ses limites mais aussi, de ses possibilités d'innovation. Ce document est entièrement subsidiaire aux documents de référence prescriptifs en matière d'évaluation au Ministère, auxquels il n'a aucune vocation à se substituer.

# Chapitre 1

## Définir la situation de référence et harmoniser les hypothèses

# 1 - Option de référence, option de projet et scénario de référence

L'évaluation socio-économique d'un projet se fait par la comparaison entre la situation si le projet est réalisé (option de projet) et une situation de référence si le projet n'est pas réalisé (l'option de référence), tenant compte de toute la durée de vie du projet. La comparaison peut s'effectuer grâce au calcul d'un bilan coûts-avantages. Ce bilan permet la comparaison de tous types de variantes alternatives d'un même projet ; on entend par variantes des scénarii concourant au même objectif que le projet : on parle alors de projets concurrents. Ces variantes peuvent se distinguer entre elles par le niveau de service considéré, les technologies et les coûts, les impacts environnementaux et les mesures consenties pour les réduire, l'étalement ou le différé des dépenses et/ou des impacts.

La définition des options de projet, de l'option de référence et du contexte macro-économique (appelé également scénario de référence) est donc primordiale dans l'évaluation socio-économique d'un projet de transports. Cette partie reprend les définitions de ces termes puis en indique les principes de mise en œuvre.

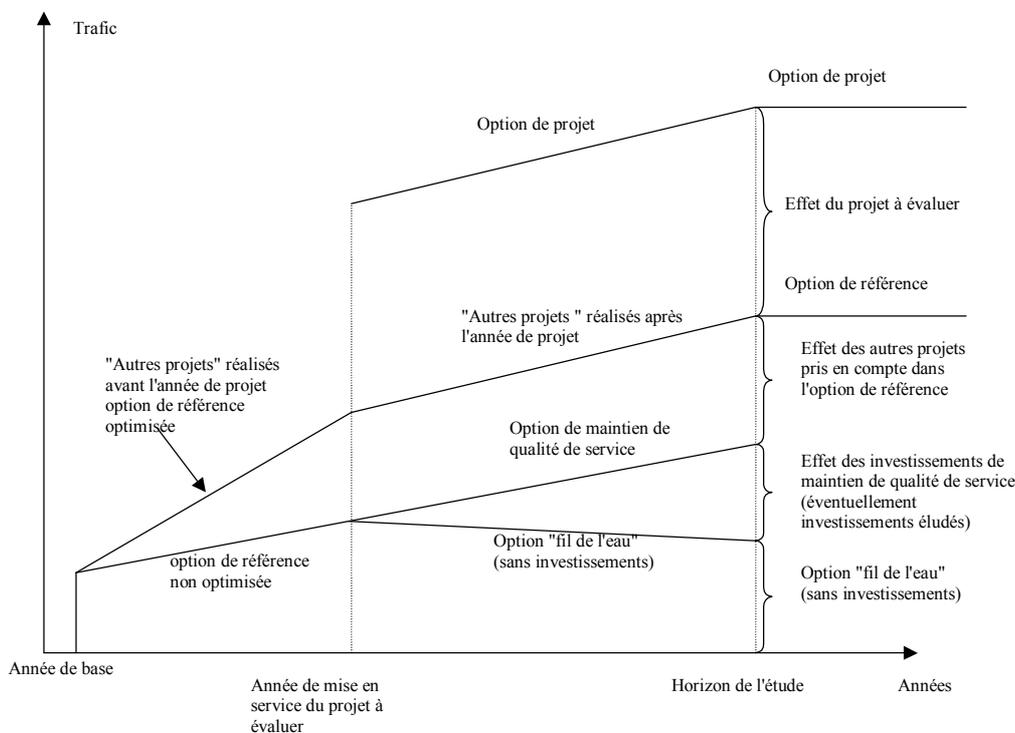
## 1.1 - Définitions

**L'option de projet** est définie comme étant une modalité de réalisation du projet combinant, le cas échéant, les partis d'aménagements envisageables, leurs variantes de tracé, les possibilités de séquençement en tranches fonctionnelles et les modalités d'exploitation.

**L'option de référence** est la situation **optimisée** la plus probable en l'absence de la réalisation du projet, à l'horizon considéré. Elle diffère donc d'une situation au fil de l'eau et d'une situation de maintien de la qualité de service. Elle ne comporte pas le projet étudié. L'option de référence sert de base à la comparaison des différents scénarios de projet étudiés.

L'option de référence et les différentes options de projet évaluées s'intègrent dans un contexte exogène au projet, le **scénario de référence**, qui leur est commun. Le scénario de référence est l'ensemble des variables exogènes au projet. Il représente donc le cadre dans lequel le projet est évalué, et il est donc par définition commun à l'option de référence et à l'option de projet. Le scénario de référence comporte donc les hypothèses sur l'évolution du PIB, de la population, du coût du carburant, etc.

## 1.2 - Description de l'option de référence



L'option de référence intègre :

- les évolutions du contexte économique, social et environnemental général, i.e. les éléments affectant l'offre et la demande de transports ainsi que les impacts du projet, mais dont l'origine se situe à une échelle dépassant largement le périmètre du projet (exemple : croissance économique, prix de l'énergie, démographie, etc...) ;
- les évolutions des paramètres affectant l'offre, la demande et les impacts du projets, dont l'origine se trouve plus directement dans le périmètre d'étude du projet ; ces éléments sont décrits plus précisément ci-après ; ils recouvrent notamment la description de l'offre de transports optimisée la plus probable en l'absence du projet étudié.

Il importe d'assurer la cohérence entre les hypothèses du scénario de référence et les choix effectués dans l'option de référence.

Les politiques de transport, d'environnement et de santé, locales, régionales, nationales et européennes doivent être prises en compte dans la définition de l'option de référence. A cet effet, l'une des options de référence devra être cohérente avec les objectifs et scénarios d'évolution découlant de la politique générale des transports, d'environnement et de santé. Lorsque certains des objectifs et scénarios d'évolution des politiques générales ne peuvent pas se décliner aisément sur la zone d'étude du projet, il est possible de retenir des hypothèses tendancielle qui prolongent les évolutions récentes.

L'option de référence intègre un réseau de référence et des composantes environnementale, sociale et économique. Le périmètre d'étude de l'option de référence doit, en théorie, être identique à celui de l'option de projet étudiée, puisque l'évaluation se fondera sur la différence entre les deux. Pour déterminer l'option de référence, il convient de considérer un territoire cohérent avec l'aire d'influence du projet (cf. ci-dessous).

La définition de l'option de référence doit également prendre en compte les autres modes de transport, notamment pour les projets à forts enjeux multimodaux.

#### *Définition de l'aire d'étude :*

L'aire d'étude du projet doit englober tous les impacts du projet : il s'agit donc de déterminer quel est le territoire concerné directement ou indirectement par le projet de transport à étudier.

Le choix de l'aire d'étude, fonction des thématiques et de la nature des impacts étudiés, est déterminant pour la qualité de l'évaluation. L'aire d'étude correspond à la zone géographique susceptible, sur chaque thème, d'être influencée par le projet ou le programme de travaux. Par exemple, pour le trafic, cette aire d'influence est déterminée comme le périmètre à l'intérieur duquel circulent tous les flux susceptibles d'être intéressés par le projet.

Sa délimitation, essentielle pour les études préliminaires, s'appuie sur les fonctionnalités du projet et sur l'organisation du territoire concerné.

Plusieurs critères dont l'importance peut varier selon la phase d'étude, sont pris en compte pour définir l'aire d'étude :

- la configuration du site ;
- l'étendue géographique du territoire nécessaire à l'approche systémique globale requise ;
- les chaînes d'interactions qui peuvent conduire à des effets à distance ;
- le périmètre concerné par l'option de référence et les options de projet envisagées ;
- l'ensemble des composantes et fonctionnalités du projet telles que les dessertes, accès, carrefours, gares, aires de maintenance, déviations de cours d'eau... ;
- les conséquences directes de l'aménagement (les emprunts et les dépôts de matériaux, les aménagements fonciers, ...).

L'aire d'étude est constituée des zones d'influence du projet résultant de la distribution de la demande de transport impactée par le projet. Ces zones peuvent dépasser très largement le périmètre géographique de l'infrastructure, notamment au regard des dessertes et correspondances nouvelles (ou trajets terminaux) qu'apportent un projet.

#### *Définition du système de transport de référence*

Le système de transport comprend le réseau des infrastructures de transport et les services associés à ce réseau. Il convient d'intégrer dans le réseau de référence :

- les coups partis (travaux effectivement démarrés) ;
- les opérations faisant l'objet d'une programmation signée ;
- tout projet ou mesure d'exploitation dont la probabilité de réalisation avant le projet étudié est forte et qui ne devrait pas être remis en cause par le projet étudié ;
- plus généralement tout élément extérieur au projet probable et ayant une influence notable sur ce dernier ;  
Ainsi, on retiendra tout aménagement ou mesure de gestion des flux dont la probabilité de réalisation avant le projet envisagé est forte et dont l'influence sur ce dernier est notable.

L'offre de transport doit être décrite par les niveaux de service pertinents pour évaluer l'impact du scénario de référence. Il peut s'agir, selon les cas, de capacités, de vitesses et de temps de parcours, de tarifs, de fréquences, de confort, de points d'arrêt ou d'échange intermodal, avec une estimation des temps et coûts de rabattement sur ces points.

Les caractéristiques de la concurrence (niveau de service, prix) doivent également être décrites dans la mesure où elles déterminent les comportements des usagers en situation de projet. Les projets et mesures tarifaires des autres modes de transport devront être pris en compte dans l'option de référence.

L'option de référence, tout comme les options de projet, est définie en précisant les coûts suivants :

- les investissements qui comprennent :
  - les infrastructures ;
  - le matériel de transport et les superstructures, lorsqu'ils sont physiquement ou commercialement liés à la détermination du service rendu ;
  - les investissements immatériels : systèmes d'exploitation, automatisation, systèmes de communication, investissements commerciaux.
- les coûts d'entretien, de maintenance et les coûts d'exploitation ; et leur évolution.

### 1.3 - Dimension temporelle de l'option de référence

L'option de référence est utilisée comme base de comparaison avec le projet étudié. L'option de référence doit normalement évoluer dans le temps. Il s'agit rarement d'un statu quo. Il importe donc que l'option de référence soit décrite le plus précisément possible au cours du temps, sur la durée de vie du projet.

L'option de référence intègre les éléments du scénario de référence ainsi que la réalisation des opérations et décisions (en dehors du projet étudié) et au fur et à mesure de leur réalisation.

Elle tient compte des opérations, des d'aménagements ou des niveaux de services lors de la mise en service du scénario d'aménagement, mais également après la mise en service. Le scénario d'aménagement est évalué en tenant compte de la mise en service des opérations ultérieures qui auraient eu lieu dans l'option de référence. De même, les coûts des opérations et décisions de l'option de référence sont pris en compte dès qu'ils sont encourus.

Il importe que les coûts d'entretien, de maintenance et d'exploitation de l'option de référence soient estimés de même que leur tendance, sur une durée longue (durée de vie du projet ou durée de l'étude).

### 1.4 - Optimisation de l'option de référence

Il importe de s'assurer que l'option de référence est optimisée. On entend par optimisée, le fait qu'elle ne recèle pas de décision et/ou d'aménagement, dont le bilan collectif serait très défavorable. Une option de référence non optimisée contribue en effet à biaiser artificiellement l'évaluation du scénario de projet qui est comparé à l'option de référence.

En particulier, il faudra tenir compte des opérations neuves, d'améliorations du réseau existant, de mesures de gestion des flux, d'actions sur la demande, qui déterminent le niveau de service. Des investissements limités sont donc souvent inéluctables de même que des évolutions de l'exploitation ou de la tarification. Ainsi, l'option de référence pourra comporter des aménagements limités, permettant un certain maintien de la qualité de service, et la mise en œuvre d'éventuelles mesures des flux. En revanche, il convient d'en exclure les solutions à examiner dans l'étude des options de projet.

Il importe également que l'option de référence soit crédible. Il s'agit en particulier de s'assurer que l'option de référence est réaliste en termes de rentabilité financière pour les acteurs. S'il apparaît que l'option de référence n'est pas soutenable au regard de certains de ses impacts, par exemple environnementaux, ou sociaux, ou de qualité de service, il importe d'explicitier pourquoi aucune décision, aucun aménagement, n'a pu limiter ces impacts dans l'option de référence choisie.

## 1.5 - Quelques outils de mise en oeuvre

Lorsqu'on travaille à un horizon lointain, et en prenant en compte les décisions de plusieurs maîtres d'ouvrage et opérateurs de modes concurrents, il peut y avoir une incertitude sur les éléments à intégrer dans l'option de référence. On pourra donc retenir plusieurs options de référence quand plusieurs situations apparaissent plausibles et peuvent avoir des effets sensibles sur l'intérêt du projet. Il peut être notamment intéressant de tester l'influence de la mise en service ou non d'infrastructures réalisées postérieurement au projet.

Cependant, il convient d'éviter la multiplication des options de référence, pour éviter d'avoir à multiplier les comparaisons de variantes de projet à différentes options de référence. En dehors des incertitudes portant sur le contexte général, il convient en pratique de réserver le choix d'une autre option de référence, au cas où il existe une grande incertitude sur une décision majeure d'un des acteurs publics ou maîtres d'ouvrages, décision qui affecterait fortement les scénarii des projets. En tout état de cause, les projets considérés comme des projets alternatifs au scénario évalué, devront constituer des variantes du projet étudié et non des variantes de l'option de référence.

La pratique des études d'évaluation a révélé la complexité de constitution de l'option de référence. La définition de l'option de référence a une influence très grande sur le résultat final. En pratique, la pertinence de l'option de référence dépend du soin apporté à chaque étape de sa définition : scénario de référence (aspects économiques, sociaux, environnementaux), objectifs et décisions des maîtres d'ouvrages du périmètre d'étude, notamment en matière d'aménagement territorial et d'offre de transports, stratégies des modes concurrents, aménagements et mesures d'exploitation de l'infrastructure en place.

De plus, l'option de référence n'est pas figée et l'évaluateur peut être amené à la reconsidérer si de nouvelles informations apparaissent le justifier au cours de l'étude.

## Chapitre 2

# Analyser les déplacements

## 2 - Modélisation

L'évaluation des projets de transport suppose de pouvoir estimer comment les déplacements seront modifiés par le projet étudié et dans le cadre de l'option de référence.

Pour estimer ces déplacements, la méthode la plus pertinente, pour les situations où la demande de transport est de nature classique et relève d'un grand nombre d'acteurs, est d'avoir recours à un modèle. D'autres approches, notamment analyses/études de marché, peuvent être préférables dans les autres cas (exemple : fret multimodal). Un modèle de transport est une représentation simplifiée des comportements de déplacement des voyageurs et des marchandises. Il consiste, schématiquement, à établir les liens entre les caractéristiques du projet et les paramètres jouant sur la demande de transport (prix, temps de parcours, fiabilité, confort), afin de déterminer comment cette demande sera modifiée par le projet.

Les modèles de transport sont de plusieurs types. On distingue généralement les modèles monomodaux des modèles multimodaux.

Les modèles peuvent également se distinguer selon le principal objectif auquel ils sont dédiés dans le cadre d'une évaluation de projet.

- Les modèles dits "de prévision" portent essentiellement sur la définition de l'option de référence sans projet : dans ce cas, on s'intéresse essentiellement à déterminer la demande à un horizon de moyen à long terme (5 à 30 ans) en partant de scénarii de croissance économique, de démographie, de prix de l'énergie, de prix relatifs, de localisation des activités, de préférences sociales structurelles. Les modèles de prévision sont en général fondés sur le traitement économétrique des séries temporelles de demande de transport et ses déterminants.
- Les modèles dits "de simulation" concernent l'estimation de l'impact du projet sur la demande par rapport à l'option de référence ; dans ce cas, on s'intéressera plus particulièrement aux modèles dont les variables d'entrée correspondent aux caractéristiques du projet supposés agir sur la demande (temps de parcours et prix relatifs par rapport aux offres ou itinéraires concurrents).

Un modèle de transport utilisé pour un projet résulte toujours d'un compromis entre l'utilisation de modèles déjà disponibles d'une part, l'adaptation voire le développement d'un modèle dédié au projet d'autre part. L'adaptation d'un modèle au projet étudié constitue toujours une étape importante de l'évaluation de projet.

En pratique, il est souvent nécessaire de combiner les modèles de prévision et de simulation pour déterminer une option de projet, dans la mesure où des paramètres d'entrée tels que le prix de l'énergie ou la valeur du temps interviennent aussi bien dans le modèle de prévision que de simulation.

Il existe également des modèles transport-urbanisme qui permettent d'évaluer les interactions réciproques entre déplacements et urbanisme. Ces modèles relèvent toutefois actuellement du domaine de la recherche.

Le lecteur est invité à se reporter au sujet des principes de fonctionnement des modèles au guide sur le pilotage des études de trafic pour l'évaluation des projets d'infrastructures routières du Sétra ainsi qu'au guide sur la modélisation des déplacements urbains de voyageurs du Certu.

Les modèles cités dans cette partie sont des modèles statiques, c'est à dire qu'ils ne tiennent pas compte des variations de trafic à l'intérieur du pas de temps considéré.

Une validation des choix concernant les différentes hypothèses retenues pour élaborer le modèle doit être effectuée tout au long de la construction du modèle.

## 2.1 - Principes généraux de modélisation

La détermination des prévisions de trafic dans l'option de référence et dans l'option de projet, à l'aide d'un modèle se décompose en deux étapes successives : la construction du modèle et l'exploitation du modèle.

La construction du modèle consiste dans un premier temps à définir son architecture globale et les lois mathématiques qui permettent de modéliser les comportements, à concevoir les bases de données et l'offre de transport sur lesquelles il s'appuie. Il s'agit ensuite de caler le modèle, c'est-à-dire de reconstituer les flux de déplacements en situation actuelle, et de le valider, c'est-à-dire à s'assurer que le modèle de trafic réagit convenablement aux changements de paramètres d'entrée du modèle.

La seconde phase de l'étude consiste à exploiter le modèle. En d'autres termes, il s'agit de modifier les paramètres d'entrée du modèle : l'offre de transport (dans le cas d'une création d'une nouvelle infrastructure par exemple) ou la demande de transport (dans le cas d'une modification du nombre de logements ou d'emplois d'une zone par exemple) et d'en mesurer les effets sur le trafic.

L'analyse est toujours réalisée par le biais d'une comparaison entre une option de référence et une option de projet. (cf. partie Option de référence, option de projet et scénario de référence).

Le choix d'un type de modèle et des principes de modélisation doit être adapté à la situation de la zone d'étude et au type de projet étudié. Dans de nombreuses situations, différentes alternatives de mode de transport sont disponibles et il faut s'attacher à les prendre en compte : on peut citer à titre d'exemple les projets en milieu urbain ou les projets de déviation d'agglomération. Dans ce cas, on s'oriente généralement vers l'utilisation d'un modèle à quatre étapes. A contrario, dans le cas de projets en zone interurbaine et en l'absence de concurrence modale, on recourt classiquement à un modèle dit d'affectation et la ou les matrices OD (par exemple une matrice VL et une matrice PL) sont généralement évaluées à partir d'observations des flux de déplacements via des enquêtes ou des comptages.

Il convient de noter que d'une manière générale, les flux de marchandises sont plus délicats à modéliser que les flux de passagers. En effet, les comportements des acteurs, chargeurs et transporteurs, dans le domaine du transport de marchandises répondent à des logiques plus complexes (choix stratégiques, investissements, gestion des risques, avantages économiques de nature logistique, procédurale ou commerciale, etc.) et souvent mal prises en compte dans les modèles, d'où le recours fréquent à d'autres outils d'analyse de la demande. Les déterminants de ces comportements sont multiples. La localisation des activités est fréquemment conditionnée par la localisation des matières premières et autres entrants du processus de fabrication, ainsi que par la localisation des marchés. Par ailleurs, le transport de marchandises est un ensemble très hétérogène que ce soit en termes de catégorie de marchandises (alimentaires, minéraux, métallurgie, chimie, autres ...) ou en termes d'unité de chargement (vracs, conteneurs, semi-remorques, ...). Cette multiplicité implique des logiques de transport très différentes selon les segments de marché, qu'il convient d'analyser de façon différenciée.

## 2.2 - Le modèle « à quatre étapes »

C'est le modèle classiquement utilisé en cas de concurrence modale.

Les 4 étapes traduisent, de façon simplifiée, les choix successifs effectués par l'utilisateur pour se déplacer :

L'étape de génération consiste à estimer le nombre de déplacements émis et attirés pour chacune des zones du modèle à partir des données socio-économiques caractéristiques de ces zones et des données de mobilité. La plupart du temps, chacun des motifs de déplacement fait l'objet d'un modèle de génération, les différents motifs sont ensuite regroupés pour obtenir les nombres totaux de déplacements par zone. Notons que dans cette étape, la structure de l'offre de transport n'intervient en général pas. Il est toutefois possible, en théorie, de représenter un lien entre l'offre de transports et la génération de trafic. Cependant, le corpus de connaissances actuel situe plutôt ces questions dans le domaine de la recherche que de la modélisation : entre autres, on s'intéresse ici à des comportements de long terme liés davantage à la localisation des activités qu'à des choix de mobilité. Pour de tels modèles, la modification de l'offre de transport est telle que l'attractivité des territoires pour la

localisation d'activités doit être prise en compte, il conviendra de bien distinguer, dans la modélisation, les effets dus à la modification de la génération de trafic, et ceux estimés à génération de trafic inchangée ;

L'étape de distribution permet de répartir les flux émis (resp. attirés) entre les différentes zones d'origine (resp. de destination). La répartition se fait en fonction des flux émis et attirés par les différentes zones et d'un critère d'impédance (généralement une distance ou un temps généralisé). A l'issue de cette étape, le modélisateur dispose d'une matrice OD (matrice origine destination) tous modes confondus.

Ces modèles supposent également que le choix de la destination est exogène pour chaque individu mais on peut également faire dépendre le choix de la destination (pour une même activité) de l'offre de transport. Le domaine de pertinence de cette approche est a priori réduite au cas où plusieurs destinations sont équivalentes en termes d'usage. A priori ceci ne concerne pas le domicile-travail ni les déplacements interurbains (sauf dans le cas du tourisme) mais plutôt les déplacements de loisirs en urbain ou périurbain.

L'étape de choix modal consiste, pour chaque couple origine destination, à attribuer aux différents modes de transport disponibles une proportion d'usagers. Cette répartition est communément faite en fonction des utilités des différentes alternatives mais elle peut également être faite à partir de courbes ou de grilles de répartition modales obtenues par observations directes de la réalité ; il convient toutefois d'utiliser ces méthodes avec précaution car elles ne permettent pas de tester les nouveaux projets (tel que l'ouverture d'une nouvelle ligne de transport collectif par exemple). Au terme de cette étape, le modélisateur dispose d'une matrice OD par mode de déplacement.

L'étape d'affectation permet enfin de confronter l'offre de transport à la demande de transport. Les usagers sont ventilés sur les divers réseaux de transport. Il existe de nombreux modèles d'affectation, ils reposent sur la comparaison des coûts généralisés des différentes alternatives. Citons notamment l'affectation tout ou rien, les modèles logit, le modèle prix temps ou encore les modèles de stratégie optimale (ces derniers étant dédiés à l'affectation sur les réseaux de transports collectifs).

Les différentes étapes exposées précédemment sont liées : l'affectation peut, par exemple, entraîner une modification des coûts généralisés ce qui va modifier la répartition modale. Il est donc conseillé de procéder à des itérations successives.

Les modèles à 4 étapes peuvent également être utilisés en endogénéisant les temps de parcours, pour conduire à des équilibres où les trafics se répartissent de manière à égaliser les coûts généralisés des différents itinéraires.

Notons que dans certains cas les étapes de génération, de distribution et de répartition modale ne sont pas réalisées. En d'autres termes, la demande de transport n'est pas modélisée, mais constitue une donnée d'entrée du modèle. Elle est évaluée à partir d'observations des flux de déplacements via des enquêtes ou des comptages qui permettent de construire les matrices OD pour les différents modes. Ces matrices OD sont ensuite affectées sur le réseau, c'est-à-dire que les usagers sont répartis sur les différents itinéraires possibles en fonction des coûts généralisés de ces divers itinéraires. On parle alors de modèle d'affectation.

## 2.3 - Présentation succincte de deux lois d'affectation

En milieu interurbain, on recourt classiquement à la loi d'Abraham ou à la loi prix-temps

### 2.3.1 - Loi d'Abraham

Le principe de la loi d'Abraham est le suivant : le flux d'une relation origine-destination est partagé entre plusieurs chemins (à définir explicitement) au prorata d'une puissance négative du temps généralisé du chemin. La répartition d'un flux  $F$  entre deux chemins 1 et 2 de temps généralisés  $G_1$  et  $G_2$  vérifie la relation :

$$F_1 / F_2 = (G_1 / G_2)^{-\theta}$$

Cette règle correspond aux observations empiriques quant à la répartition du trafic entre itinéraires concurrents : des chemins de temps égal supportent des trafics équivalents, mais si les temps diffèrent alors un chemin plus court reçoit davantage de trafic qu'un chemin plus long. Le paramètre positif  $\theta$  détermine le rôle de la différence des temps généralisés dans la différence de répartition. S'il est très faible, la répartition dépend peu de l'écart des temps, mais s'il est très élevé alors le chemin le plus court reçoit la quasi-totalité du trafic. Cette loi peut s'écrire également avec la méthode dite des potentiels, où les chemins empruntés par une OD vérifient :

$$F_1 (G_1)^\theta = \dots = F_k (G_k)^\theta \quad \text{où, avec } k \text{ chemins empruntés, on a : } \sum_{j=1}^k F_j = F_{OD}$$

Cette formulation permet de généraliser la loi de répartition à plus de deux itinéraires en concurrence. On peut également l'écrire de la façon suivante : la proportion de trafic qui emprunte le chemin  $i$  d'une OD vaut

$$\frac{F_i}{F_{OD}} = \frac{(G_i)^{-\theta}}{\sum_{j=1}^k (G_j)^{-\theta}}$$

On note qu'avec cette loi, tout chemin sélectionné reçoit une part de trafic non nulle. C'est la loi d'Abraham qui était implémentée dans le logiciel Ariane.

### 2.3.2 - Loi d'arbitrage Prix-Temps

Par analogie avec les modèles économiques, le modèle prix - temps différencie les demandeurs de déplacement, i.e. les usagers, au moyen d'un attribut de valeur du temps qui est distribué statistiquement parmi la population.

Les demandeurs à forte valeur du temps préfèrent les itinéraires rapides même s'ils sont chers, tandis que les demandeurs à faible valeur du temps choisissent les itinéraires moins chers, même s'ils sont plus lents. Le prix - temps élimine les itinéraires inefficaces : il exclut ainsi tout chemin tel qu'il en existe un autre à la fois plus rapide et moins cher.

On fait l'hypothèse que la valeur du temps des usagers est répartie de façon continue au sein de la population, selon une distribution log-normale. Cette loi est couramment utilisée pour représenter la distribution d'une valeur positive au sein d'une population comme la valeur du temps (et aussi par exemple les revenus des ménages). Cette distribution est définie à l'aide de deux paramètres, sa moyenne et son écart-type.

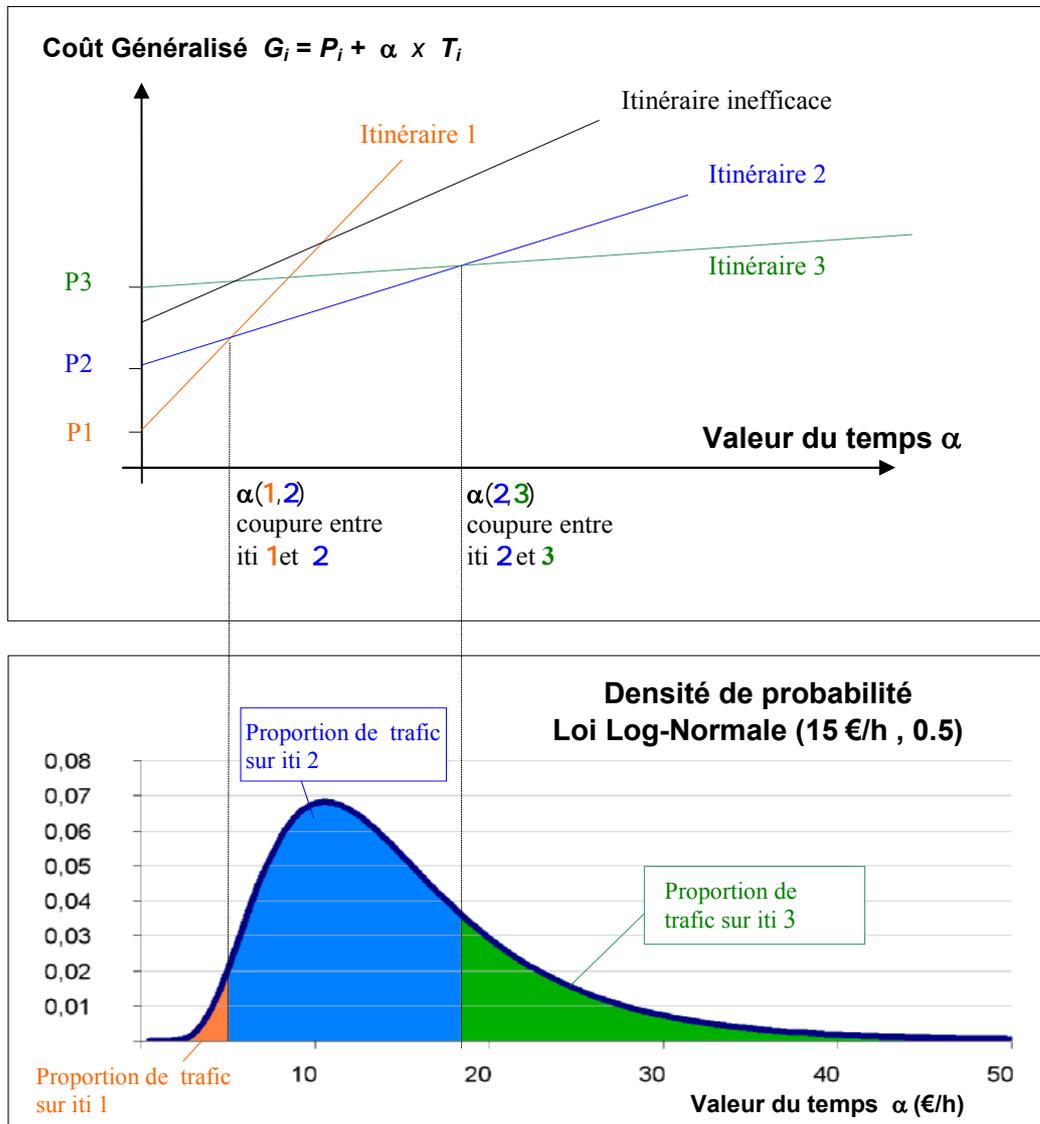
La règle de choix d'itinéraire par l'utilisateur exprime simplement sa rationalité économique individuelle : chaque usager choisit l'itinéraire qui minimise son coût généralisé :  $G = P + \alpha T$  où

$P$  est le prix, c'est-à-dire les coûts de circulation, de péage...

$T$  est le temps de parcours sur l'itinéraire

$\alpha$  est la valeur du temps des usagers.

La règle s'illustre sur un diagramme des coûts généralisés des itinéraires en fonction de la valeur du temps des usagers pour une O-D



Sur le premier graphe, l'enveloppe inférieure des coûts généralisés représente le coût généralisé minimum offert par les différents itinéraires de la relation O-D à chaque valeur du temps. Pour chaque valeur du temps, elle donne l'itinéraire (ou chemin) choisi.

On peut déterminer graphiquement la valeur du temps de coupure  $\alpha^*$  entre les itinéraires 1 et 2, donnée par l'intersection des deux droites correspondant aux deux itinéraires :

Itinéraire 1 de temps  $T_1$  élevé et prix  $P_1$  bas, droite d'équation :  $G = P_1 + \alpha T_1$

Itinéraire 2 de temps  $T_2$  bas et prix  $P_2$  élevé, droite d'équation :  $G = P_2 + \alpha T_2$

$$\alpha^* = \frac{P_2 - P_1}{T_1 - T_2}$$

La résolution donne :

L'itinéraire 1 est choisi par les usagers dont la valeur du temps est inférieure à la valeur du temps de coupure  $\alpha^*$  (parfois aussi appelée valeur du temps critique). Ainsi, la proportion d'usagers affectés au chemin 1 est égale à

la probabilité de choisir le chemin 1. Elle est égale à la probabilité que l'utilisateur ait sa valeur du temps inférieure à  $\alpha$  \* que l'on peut déterminer à l'aide de la fonction de répartition cumulée.

Les modules SETRA permettent de réaliser une affectation prix-temps sous TransCAD.

## 2.4 - Données d'entrée des modèles

La collecte des données d'entrée des modèles est une étape qui nécessite une attention particulière puisqu'elle conditionnera la qualité des résultats en sortie des modèles. Il faut toutefois noter que la collecte des données est généralement longue et fastidieuse.

Il existe deux types de données d'entrée pour les modèles de déplacements : celles relatives à l'offre de transport et celles relatives à la demande de transport.

### 2.4.1 - Données d'offre de transport

Les données d'offre permettent de représenter les différents réseaux de transport. Il est nécessaire de représenter d'une part les données liées aux infrastructures de transport (i.e. liées aux caractéristiques physiques) et les données liées aux services de transport (i.e. liées au fonctionnement des réseaux de transport notamment les coûts de circulation et les temps de parcours).

Les sources des données d'offre sont multiples, il peut s'agir de bases de données telles que la base 30 000 arcs utilisée au sein du RST des divers exploitants des réseaux (sociétés d'autoroutes, DIR, Conseils Régionaux, Conseils Généraux, SNCF, exploitants des transports en commun) ou des autorités organisatrices de transport (Conseils Régionaux, Conseils Généraux, communes ou intercommunalités, syndicats mixtes des transports).

Le mode de représentation de ces caractéristiques varie selon les modes de transport.

#### Mode routier

Concernant les caractéristiques physiques, il s'agira de détailler le tracé des routes, la longueur de l'infrastructure, le type de route (autoroute, route nationale, départementale...), le nombre de voies, les pentes, les capacités, la position des échangeurs, des carrefours.

Concernant les caractéristiques de fonctionnement du réseau, on s'attachera à décrire les vitesses, les temps de parcours, les coûts de transport, les interdictions de circulation des poids lourds, les interdictions de transit, les mouvements tournants. Les coûts de transport à prendre en considération sont les coûts de péage et les coûts d'usage du véhicule qui comprennent les coûts d'entretien, les coûts de dépréciation et les coûts de carburant.

#### Transports collectifs

Concernant les caractéristiques physiques des réseaux, il convient de distinguer les modes à infrastructures dédiées - mode ferroviaire, métro et tramway et TCSP non ferrés - des autres modes collectifs - bus et cars. Dans le premier cas, il sera nécessaire de décrire le tracé des infrastructures ainsi que la position des gares ou arrêts. Dans le second cas il n'existe pas d'infrastructures dédiées, les bus et cars circulant sur le réseau routier : il faudra toutefois détailler la position des arrêts de bus sur le réseau routier dont les caractéristiques physiques auront précédemment été définies comme indiqué ci-dessus.

Concernant les caractéristiques de fonctionnement des réseaux, il s'agira de décrire les coûts de transports et de donner les caractéristiques des lignes de transports collectifs. Les coûts correspondent au prix payé par les usagers : ils peuvent être forfaitaires, varier en fonction de la distance, ou être spécifiques à une ligne. Les lignes de transports collectifs (y compris fret ferroviaire) sont décrites via la succession des arrêts desservis et les itinéraires suivis ainsi que leur vitesse commerciale et les fréquences de desserte. Pour une même ligne de transports collectifs, il est en outre possible d'avoir différents niveaux de service : il faudra par exemple distinguer, dans le cas du RER, les missions correspondant à une desserte de tous les arrêts des missions

desservant une sélection d'arrêts uniquement. Il est également nécessaire de décrire les temps de parcours. Dans le cas des transports collectifs, il est possible de décomposer le temps de parcours porte à porte de la manière suivante : temps d'accès à l'arrêt de première montée dans les TC, temps d'attente, temps passé à bord, temps de correspondance, temps pour rejoindre la destination finale. Pour plus de détails sur les composantes tarifaires et temporelles, le lecteur est invité à se reporter à la partie Coût généralisé .

## Projets intermodaux

Pour les projets intermodaux (voyageurs et marchandises), il convient de décrire les caractéristiques des points d'échange : localisation, frais de fonctionnement, distances ou temps d'échange (y compris temps d'attente ou de chargement-déchargement), capacités ou files d'attente.

Notons également la possibilité d'introduire des bonus ou malus aux coûts de transport, ce qui permet de tenir compte des différentiels d'utilité liés notamment au confort, à la fiabilité, à l'information des usagers, à la régularité ou à la sécurité des différents réseaux (un tramway est par exemple réputé plus confortable qu'un bus, une autoroute plus qu'une route nationale).

Par ailleurs, il est important de signaler que les caractéristiques de fonctionnement des réseaux de transports varient en fonction de la période considérée. Par exemple, en milieu urbain, les temps de parcours sur le réseau routier sont généralement différents en heure de pointe et en heure creuse. De même pour les réseaux de transports collectifs, la fréquence est généralement plus élevée en heure de pointe.

### 2.4.2 - Données de demande de transport

Afin de modéliser la demande de transport, la première étape consiste à définir un zonage, c'est-à-dire un découpage de l'aire d'étude sur la base duquel on établira une ou plusieurs matrices OD (matrice origine destination). Le zonage constitue le pas géographique de base du modèle : par la suite on considèrera les flux à destination ou originaires des zones du découpage, sans distinguer de destination ou d'origine plus précise à l'intérieur de la zone. En effet chaque zone se voit attribuer un centroïde, point fictif où se concentre l'ensemble des déplacements émis et attirés par la zone. Notons que le zonage doit naturellement être cohérent avec les données d'offre et de demande de transport vis à vis de son niveau de détail et de la délimitation des zones, pour être cohérent avec les itinéraires de transport et avec les zones résidentielles et d'emplois. En outre, il se doit d'être fin à proximité du projet et peut être plus grossier quand on s'en éloigne.

Selon les modèles, la demande de transport peut être modélisée à partir de données socio-économiques ou estimées directement à partir d'enquêtes de circulation, d'enquêtes voyageurs et de comptages. Les données socio-économiques sont la taille et la structure de la population des zones, le nombre et la structure des emplois, les effectifs scolaires ou encore la motorisation des ménages. Ces données peuvent être obtenues auprès de l'INSEE ou des agences d'urbanisme.

Les données relatives aux déplacements de voyageurs et au flux de marchandises sont issues de comptages ou d'enquêtes telles que les Enquêtes Ménages Déplacements (EMD), les enquêtes Cordon, l'Enquête Nationale Transports et Déplacements (ENTD), les enquêtes OD routières ou transports collectifs et les enquêtes relatives au fret (enquête TRM, enquête Transit, enquête CAFT).

## 2.5 - Calage

Dans la construction d'un modèle de déplacements, le calage du modèle est une étape essentielle qui consiste à ajuster les données d'entrée et les paramètres du modèle afin que celui-ci représente au mieux une situation telle qu'elle est observée. Pour cela on confronte les résultats du modèle aux données observées. En théorie on doit séparer les données en deux parties, la première étant utilisée pour paramétrer le modèle (le calibrage), la deuxième devant servir à valider le modèle (la validation).

L'objectif est que le modèle reflète de façon simplifiée les comportements observés en prenant en compte les phénomènes explicatifs de ces comportements ; le calage permet d'exploiter ensuite ce modèle en réalisant des prévisions de trafic.

Pour le calage des modèles d'affectation, les données observées et modélisées à comparer sont les suivantes : volume de trafic par section, temps de parcours, répartition entre itinéraires concurrents.

Dans le cadre de l'évaluation des projets interurbains, on modifie rarement les données sur la demande de trafic issues des enquêtes, le calage se concentrant surtout sur des corrections apportées au réseau. Concrètement, les modélisateurs ajustent : le nombre et la position des points d'injection de la matrice OD, les paramètres d'affectation, le niveau de description du réseau et les caractéristiques de coût et de temps de parcours des arcs, les trafics locaux.

On mesure les écarts entre les résultats du modèle et les données observées, puis des corrections sont apportées afin de réduire les écarts les plus importants, en commençant par des ajustements globaux et en allant vers des modifications de plus en plus locales.

Parce qu'il existe plusieurs possibilités de modifications pour réduire les écarts entre le modèle et les observations, il n'existe pas de méthode automatique permettant de faire ces ajustements. C'est ici que le modélisateur apporte une grande valeur ajoutée au modèle, car il réalise les modifications les plus pertinentes à partir de sa connaissance de la zone d'étude.

Le lecteur est invité à se reporter au guide du Sétra sur le calage et la validation des modèles pour plus de détails.

## 2.6 - Simulation

Il s'agit de modifier les paramètres d'entrée du modèle en fonction des caractéristiques du projet étudié, l'offre de transport ou la demande de transport, et d'en mesurer les effets sur le trafic.

Si les étapes de modélisation de la demande et de l'offre de transport, de définition du cadrage économique et de calage du modèle d'affectation ont été rigoureusement validées, l'étape de simulation ne devrait pas poser de problème majeur de réajustement du modèle. En réalité, il s'agit plus de mettre en forme les différents résultats de l'étude de trafic et d'alimenter les autres volets de l'étude de projet (études socio-économique et financière en particulier).

## 2.7 - Résultats en sortie du modèle

En sortie du modèle, on obtient les résultats sur le volume et la structure de la demande de transports (pourcentage de poids lourds, trafic de transit, d'échange, local, fréquentation des lignes de transport collectif), sur les itinéraires ou lignes empruntés par les usagers, sur les coûts et temps de parcours (qui peuvent être moyennés par origine-destination ou être relatifs à chacun des itinéraires).

L'ensemble de ces résultats est obtenu à chaque horizon d'étude pour l'option de référence et pour l'option de projet, ce qui autorise d'une part les comparaisons à un horizon donné entre option de référence et option de projet, et d'autre part permet de connaître les chroniques de demande de transports, utiles pour réaliser un bilan socio-économique.

Par ailleurs, comme indiqué précédemment, de multiples résultats peuvent être dérivés des données issues du modèle (consommation de carburants, émissions de gaz à effet de serre et de divers polluants, etc...).

Le modèle peut également fournir les valeurs du temps (ou du confort – cf. partie Coût généralisé et valeur du temps) caractéristiques des arbitrages entre modes/itinéraires, qui peuvent alors être comparées dans un souci de robustesse, aux valeurs dites "tutélaires" utilisées pour le calcul socio-économique.

## 2.8 - Références réglementaires et bibliographiques

- Guide des études de trafic interurbain, Guide méthodologique, SETRA, 1992.
- Evaluation des projets d'infrastructures routières – Pilotage des études de trafic, Guide méthodologique, SETRA, 2007
- Sétra Les outils d'évaluation des projets routiers – d'Ariane à TransCAD. Rapport d'études, SETRA, 2010
- Guide d'utilisation de TransCAD pour la représentation de l'offre et de la demande de transport multimodales, Guide, SETRA, 2010, (réservé à un usage interne au ministère)
- Guide d'utilisation des Modules Sétra de TransCAD – version 6.21, SETRA, 2010. (réservé à un usage interne au ministère)
- Guide sur le calage et la validation des modèles de trafic – Techniques appliquées à l'affectation routière interurbaine, Guide Méthodologique, SETRA, 2010
- Comportements de déplacement en milieu urbain : les modèles de choix discrets - Vers une approche désagrégée et multimodale, CERTU, 1998
- Modélisation des déplacements urbains de voyageurs - Guide des pratiques, Guide méthodologique, CERTU, 2003

## 3 - Coût généralisé et valeur du temps

La théorie économique est fondée sur le principe qu'un usager d'un système de transport cherche à maximiser son utilité. Ce faisant, l'usager est disposé à payer un service (en l'occurrence de transports) à un prix inférieur à son utilité marginale ; dit autrement, la dépense qu'il consent pour acheter ce service est inférieure ou égale à l'utilité qu'il gagne en consommant ce service.

Dans ses choix de transports, l'usager doit, schématiquement, faire deux types d'arbitrages :

- d'une part, il arbitre entre l'achat de services de transports et d'autres dépenses de consommation ;
- d'autre part, il arbitre entre le temps passé dans les transports, au travail, et dans ses autres activités (notamment de loisirs).

On montre alors que l'on peut exprimer simplement les choix de cet usager, en considérant le « coût généralisé » de transports, qui est la somme de la dépense monétaire de transport et du temps passé, pondéré par une valeur monétaire, dite « valeur du temps ». Il convient de noter que cette valeur du temps peut être différenciée selon les usagers, les motifs, les types de marchandise...

Le choix de l'usager s'exprime alors simplement à partir de cette notion de coût généralisé :

- l'usager est disposé à utiliser le service de transports dès que son coût généralisé est inférieur à l'utilité retirée de sa consommation de ce service (par exemple pour produire ou consommer des biens, des services ou des loisirs) : cette utilité est dénommée « coût généralisé de réservation » ;
- l'usager cherche, pour un service de transports présentant plusieurs alternatives (modes, itinéraires, le cas échéant horaires), à minimiser le coût généralisé de transports ;
- l'utilité nette (ou « surplus ») que l'usager retire de l'utilisation d'un service de transports est égale à l'écart entre le coût généralisé qu'il doit consentir pour ce service, et celui qu'il est disposé à payer pour ce service (coût généralisé de réservation). (voir la partie Bilan coût avantages collectif actualisé et indicateurs complémentaires).

Ces notions permettent alors d'utiliser très simplement le coût généralisé pour décrire les choix des usagers face à des modes ou itinéraires de transports se distinguant à la fois par leurs caractéristiques liées au temps, et par leurs prix/coûts. A noter que, par extension, le coût généralisé peut prendre en compte des attributs de qualité des services de transports (fréquence, régularité, confort, fiabilité, information)

### 3.1 - Définition

Le coût généralisé du déplacement de l'usager, de l'origine à la destination s'écrit, dans sa forme la plus simple :

$$C_g = P + \alpha T$$

Avec  $C_g$  coût généralisé

$P$  composante monétaire

$\alpha$  valeur du temps

$T$  composante temporelle

Il est possible de complexifier cette formulation afin de prendre en compte d'autres composantes qui influencent les choix des usagers (fiabilité, qualité de service...).

Le coût généralisé est additif : dans le cas d'un trajet multi-trançons ou multimodal, le coût généralisé sera calculé en faisant la somme des coûts généralisés des trajets effectués sur chaque trançon et/ou avec chaque mode.

Le coût généralisé est utilisé :

- dans les travaux de modélisation : en effet le choix d'un usager (des modes, des itinéraires, voire des destinations, des heures de départ), est étudié en comparant l'utilité respective et la maximisation de cette utilité, sous contrainte de revenu et de temps disponible. Cette utilité, pour sa composante transports, dépend d'un "corpus" de descripteurs communs (temps, divers attributs du confort). Chaque usager, au travers de ce programme de maximisation, révèle l'utilité marginale qu'il attribue au temps et aux autres attributs de confort. Ex post (une fois ces utilités marginales révélées dans ses choix), on peut donc "simplifier" son programme de maximisation, puisqu'il suffit de comparer la somme pondérée de ces critères (temps, confort) pour ses différents choix, la pondération étant les utilités marginales. Notons par ailleurs, qu'on peut aussi choisir de ne pas prendre en compte tous les attributs candidats à déterminer les choix des usagers par manque de données ou parce qu'ils se révèlent non significatifs dans les modèles.

- dans l'évaluation du surplus des usagers pour le bilan socio-économique :

- le surplus dégagé par l'amélioration d'un service de transports est égal, pour chaque usager consommant déjà ce service de transports, à l'écart entre le coût généralisé après projet et le coût généralisé avant projet ;

- pour les usagers qui ne consommaient pas le service de transports avant le projet, ce surplus est égal à l'écart entre leur coût généralisé de réservation et le coût généralisé après projet.

La valeur du temps, révélée par les modèles, dépend des paramètres inclus dans le coût généralisé. Il est donc nécessaire d'explicitier clairement les paramètres utilisés dans le modèle afin de permettre l'utilisation de cette valeur du temps.

## 3.2 - Décomposition schématique du coût généralisé

Il convient de considérer cette partie comme une boîte à outils listant, de manière non exhaustive les différents paramètres qu'il est possible d'intégrer au coût généralisé. Les paramètres à intégrer dépendent naturellement du projet étudié.

Le coût généralisé des voyageurs est composé des coûts ou dépenses directs, coûts ou dépenses indirects, de paramètres liés au temps (dit « temps généralisé »). Il est également possible d'intégrer d'autres paramètres (fiabilité, qualité de service...).

La notion de temps généralisé est utile pour tenir compte du fait que les diverses séquences de temps n'ont pas toutes la même valeur pour les usagers : l'attente ou la correspondance, ou le temps passé en hypercongestion, et/ou en retard et/ou sans information ne sont pas ressentis de la même façon qu'un temps de trajet « calme et sûr ».

De plus, selon les besoins des études, d'autres paramètres du temps généralisé peuvent être pertinents, et doivent être renseignés ou approfondis en fonction des objectifs du projet : ainsi, dans un projet s'intéressant plus particulièrement à la fréquence de desserte, il conviendra de bien renseigner ce paramètre et d'estimer le plus précisément possible, la valeur attribuée à la fréquence, qui n'est pas nécessairement toujours égale à la valeur du temps moyen d'attente entre deux dessertes.

Les principales composantes du coût généralisé voyageur			
Coût généralisé du déplacement	Coûts directs	Voitures particulières	Péages
			Stationnement
		Transports collectifs	Billets
	Coûts indirects	Voitures particulières	Carburant
			entretien du véhicule (entretien courant, pneumatiques, lubrifiant)
			Dépréciation du véhicule
	Temps généralisé	Voitures particulières	Durée du déplacement
			Niveau de confort de la route
		Transports collectifs	Temps d'accès, temps d'attente et temps de correspondances
			Temps à bord
Trajet de nuit			
Autres composantes	Tous modes	Fiabilité ou autres attributs de qualité de service,...	

Les coûts généralisés listés ci-dessus sont supposés refléter les choix des usagers à une date donnée. Aussi, dans l'évaluation des projets, il est important que les paramètres du coût généralisé et les valeurs du temps liées aux composantes du temps généralisé, soient datés, i.e. estimés annuellement pendant toute la période sur laquelle est évalué le projet.

### 3.3 - Composante liée aux coûts

Pour le mode routier, les coûts à considérer sont les coûts de péage, les coûts de stationnement et les coûts indirects liés au fonctionnement qui comprennent les coûts de carburant, les coûts d'entretien des véhicules et les coûts de dépréciation des véhicules.

#### Coûts de péage :

Les coûts de péage correspondent aux prix payés par les usagers pour circuler sur les infrastructures à péages (autoroutes concédées, ouvrages d'art). Ces coûts doivent idéalement être définis au cas par cas, différenciés selon le type d'utilisateur et tenir compte des formules d'abonnement proposées. En l'absence d'informations spécifiques, il est possible d'utiliser les valeurs nationales de péages.

### **Coûts de stationnement :**

La prise en compte du coût du stationnement est importante lorsque l'on compare la pertinence des modes en milieu urbain. On cherchera à estimer un coût moyen du stationnement en tenant compte de l'offre gratuite de stationnement, et des différentes tarifications proposées.

### **Coûts de carburant et autres énergies (dont électrique) :**

Le coût payé par les usagers pour leurs déplacements est le produit du prix d'achat (€ / litre) et de la consommation du véhicule (litre / km). Pour les poids lourds, l'indicateur à retenir est le prix hors taxes récupérables. Le coût de carburant tient compte d'une répartition du parc en fonction du type de carburant ou d'énergie.

### **Coûts d'entretien des véhicules :**

Le coût d'entretien des véhicules comprend les coûts d'entretien courant, les coûts des pneumatiques et des lubrifiants.

### **Coûts de dépréciation des véhicules :**

Ce poste de coût concerne uniquement les VL. Pour les PL, la dépréciation s'apprécie surtout en fonction du temps d'utilisation. La décote du véhicule liée à son usage est donc prise en compte dans la valeur du temps des PL.

## **3.4 - Composantes liées au temps généralisé**

Le temps généralisé prend en compte la durée totale du déplacement, mais intègre également des éléments liés à la qualité de service : régularité, temps de correspondance, congestion etc.

Le temps à considérer doit être de porte à porte.

### **3.4.1 - Mode routier**

Le temps de parcours dépend de la charge de trafic (débit) sur le réseau. Il est calculé par l'intermédiaire de courbes temps-débit. Ces courbes utilisent divers paramètres tels que le temps de parcours à vide (correspondant à la vitesse libre), la capacité (ou débit de saturation), les facteurs de concentration et d'autres paramètres qui dépendent de leur formulation. Elles sont calibrées pour différents types de routes, à partir de recueils nationaux de données de débit et de vitesse sur une sélection de routes représentatives. En milieu urbain, il peut être pertinent de prendre en compte le temps de recherche d'une place de stationnement.

### **3.4.2 - Transports collectifs**

Pour les modes collectifs, il faut comptabiliser les temps d'accès, les temps d'attente (dont les temps de correspondance) et les temps passés à bord des véhicules.

Les différentes composantes temporelles du déplacement sont ressenties différemment par les usagers. Ainsi, les temps d'attente, de correspondance et de marche à pied sont perçus comme plus pénalisants que les temps passés à bord du véhicule. Afin de prendre en considération ce phénomène, il est nécessaire de pondérer les différentes composantes temporelles. Un coefficient égal à 1 est généralement attribué au temps passé à bord du véhicule, les autres composantes se voient attribuer un coefficient variant entre 1,5 et 3.

### **Temps d'accès :**

L'accès aux transports collectifs urbains (ou la diffusion après usage des transports collectifs urbains) se fait principalement en marche à pied, mais peut se faire par d'autres modes. Pour le mode marche à pied, la pratique généralement utilisée est d'estimer le temps sur la base d'une vitesse de 4 km/h.

### **Temps d'attente :**

Les temps d'attente sont pris en compte avant chaque montée à bord d'un transport collectif. Il peut donc s'agir de la première montée à bord, ou de correspondances. Dans les deux cas, le temps d'attente est estimé en fonction de la fréquence de la ligne et de sa régularité.

Le guide du Certu préconise la formule suivante :  $t_{\text{attente}} = a / f$  où  $f$  est la fréquence de la ligne et  $a$  un paramètre caractéristique de la distribution des arrivées des véhicules et des passagers à l'arrêt. Dans le cas où l'on considère que les véhicules arrivent suivant une loi constante de paramètre  $1/f$  et que les usagers arrivent suivant une loi uniforme,  $a$  peut être approximé par la valeur 0,5, valeur généralement retenue pour les études. Pour le mode ferroviaire, les fréquences étant moins élevées, on peut retenir la valeur 0,25 pour  $a$ . Notons par ailleurs que cette formulation est uniquement valable pour des fréquences élevées. En effet, dans le cas où les fréquences des lignes sont faibles, c'est-à-dire que les temps entre deux véhicules successifs sont élevés, les usagers connaissent généralement les horaires de la ligne et se rendent aux arrêts en fonction de ces derniers. C'est pourquoi, la formule précédente est habituellement majorée afin de tenir compte de ce phénomène. Suivant les modèles et les modes, le temps d'attente est majoré différemment, par exemple 15 min pour les transports collectifs urbains et une heure pour le mode ferroviaire.

### **Temps à bord :**

Le temps à bord peut être déterminé à partir des horaires théoriques ou via les vitesses commerciales des lignes. Il doit tenir compte d'une éventuelle saturation (par exemple, saturation du réseau routier pour les bus sans site propre). En outre il est possible de décomposer le temps passé à bord suivant différentes situations : temps passé à bord en situation fluide / temps passé à bord en situation congestionnée, temps passé à bord en journée/temps passé à bord la nuit, temps passé à bord assis/temps passé à bord debout... Chacune de ces composantes peut ainsi être pondérée par un coefficient reflétant la pénibilité des différentes situations.

### **Temps de correspondance :**

Les temps de correspondance entre deux lignes sont directement liés à la configuration des stations. Ils dépendent également de la vitesse de déplacement en marche à pied des usagers, généralement fixée à 4 km/h, comme indiqué précédemment. Outre le temps effectif de correspondance, il est possible d'ajouter un temps de pénalité qui traduit la pénibilité liée aux ruptures de charge et aux configurations des stations.

### **Interfaces intermodales :**

Les temps de transfert entre modes doivent être pris en compte ; ils incluent les temps de parcours à l'intérieur des pôles d'échanges, le temps de recherche d'information (sur les plateformes de départ, les entrées des correspondances), le temps de dépose / reprise du véhicule dans le cas des parcs-relais.

Pour les marchandises, il convient de tenir compte des temps de chargement / déchargement, des temps éventuels liés aux inspections, formalités de douane.

Toute contrainte assimilable à une heure limite d'enregistrement ou d'embarquement doit être prise en compte dans le temps généralisée.

Lorsque des contraintes de capacité se peuvent se traduire en phénomènes de file d'attente (*cf.* aéroports, transport combiné, ports, ferries), il convient de traduire ces phénomènes en temps d'attente supplémentaire.

### 3.5 - Valeur du temps : un consentement à payer pour gagner du temps

A partir des paramètres de temps et de coûts intégrés dans le coût généralisé, on peut déduire la valeur du temps qui correspond à l'arbitrage des usagers observé par le calage du modèle de trafic entre ces éléments.

Formellement, le programme de l'utilisateur peut s'écrire ainsi :

$$\text{Max } U(q_1, \dots, q_n)$$

Avec

$$\sum t_i \cdot q_i \leq T \text{ (contrainte de temps) et } \sum p_i \cdot q_i \leq r \text{ (contrainte de revenu)}$$

où  $U$  est l'utilité du consommateur

$q_i$  représente la quantité du bien  $i$  qu'il consomme

$p_i$  est le prix du bien  $i$

$t_i$  est le temps nécessaire pour consommer une unité du bien  $i$

$r$  est le revenu du consommateur

$T$  est son temps disponible pour la consommation

Si l'on appelle  $\lambda$  la variable duale de la contrainte de revenu et  $\mu$  la variable duale de la contrainte de temps, la valeur du temps s'écrit :  $VT = \frac{\lambda}{\mu}$ .

La valeur du temps va donc se déduire de la formule d'utilité qui sera utilisée dans la modélisation, et des paramètres de temps et de coûts entrant dans le coût généralisé.

La valorisation économique des gains de temps et de confort engendrés par un projet de transport consiste à monétariser la variation des temps de parcours des voyageurs et marchandises, sur l'ensemble de la période d'évaluation du projet, entre l'option de référence et l'option de projet.

La valeur du temps est définie comme le consentement à payer d'un usager pour réduire son temps de transports. Cette valeur dépend a priori de chaque usager.

Les arbitrages effectués par un usager entre le temps consacré au déplacement d'une part, le temps consacré à d'autres activités (travail, loisirs, repos) d'autre part, révèlent la valeur attribuée au temps de transports.

Les arbitrages effectués par l'utilisateur entre différentes alternatives de transports caractérisées par des temps de trajet différents, mais également des conditions de confort différentes, révèlent les valeurs attribuées au temps d'une part, à ces conditions de confort d'autre part.

#### Valeur révélée et valeur générique

En théorie, les valeurs révélées par ces choix (d'itinéraires, de mode, de destination ou d'activité) dans les modèles de transports, doivent être utilisées pour la valorisation socio-économique des bénéfices retirés d'une amélioration des temps de trajet et/ou des conditions de confort. La modélisation de la demande propre à chaque projet devrait révéler les valeurs du temps des usagers de ce projet. En théorie, il ne saurait donc y avoir de valeur du temps « générique », indépendamment du projet de transports et des usagers auxquels il s'adresse.

Dans un souci de simplification et de lisibilité des évaluations, des valeurs du temps « génériques » sont parfois utilisées pour la monétarisation des gains de temps, indépendamment des valeurs révélées par la modélisation de la demande. Ces valeurs « génériques » sont désignées par le terme de valeur « tutélaire ».

Pour l'évaluation des projets, il est en général préférable d'utiliser des valeurs du temps révélées, déduites du calage des modèles de demande, car ces valeurs reflètent des comportements observés.

En l'absence de possibilité de calage de tels modèles, on peut, par défaut, utiliser des valeurs issues de calages sur des projets comparables, ou au niveau national ; par défaut encore, on peut utiliser les valeurs tutélaires. En tout état de cause, notamment en cas de difficultés de calage des modèles de demande, il convient d'effectuer des tests de sensibilité de la valorisation monétaire des avantages du projet, à ces différentes valeurs du temps.

### **Valeur du temps et équité**

L'utilisation de la valeur du temps révélée peut sembler poser des problèmes d'équité car la valeur du temps augmente avec le revenu. L'utilisation d'une valeur révélée dans le calcul socio-économique induit donc que l'on donne plus de valeur au temps gagné par les personnes ayant les plus forts revenus car ils sont prêts à payer plus cher pour gagner du temps. Cependant, le rapport Boiteux explique que "par construction, un calcul des valeurs du temps fondé sur l'étude des comportements des usagers ne permet pas de prendre en considération des exigences d'équité géographique ou sociale, ni de favoriser un mode de transport au détriment d'un autre. Quand de telles considérations doivent peser sur les choix, il est loisible de pondérer l'ensemble des gains et des pertes (et pas seulement les gains et pertes de temps) de façon que certaines catégories ou zones soient plus favorisées, ou de différencier les seuils de rentabilité par type de projet. Mais la connaissance des disponibilités à payer demeure utile car, outre les éléments d'information qu'elle apporte pour fixer des valeurs normalisées, elle seule permet de mesurer ce que l'on sacrifie à l'équité en termes d'efficacité".

## **3.6 - Différentiel d'utilité : le malus d'inconfort et la fiabilité**

### **3.6.1 - Malus d'inconfort**

En théorie, les attributs de confort comportent plusieurs dimensions : confort matériel, place disponible, services et informations disponibles pendant le trajet, sentiment de sécurité, exigences attentionnelles pour la conduite. Dans le même ordre d'idées, le temps passé en situation de congestion peut différer de celui passé en situation fluide : surcharge attentionnelle, stress. De même, le temps ressenti dans de longs trajets peut présenter une valeur supérieure, illustrant le phénomène de fatigue et de lassitude. Le temps passé dans les situations de rupture de charge et/ou changement de mode et/ou d'attente peut, présenter une valeur différente pour l'utilisateur de celle passée dans les transports.

En pratique, pour simplifier, les différents attributs de confort et/ou qualité de service sont parfois ramenés à un indicateur unique, dénommé « malus d'inconfort » en interurbain, ou bonus/ malus de qualité de service en urbain, qui caractérise un mode ou un itinéraire. Cet indicateur est lié soit plutôt au temps de parcours (en transports collectifs) soit plutôt de la distance parcourue (en transports routiers). Il est défini comme la valeur qui rend indifférentes pour l'utilisateur deux alternatives de transports de même temps de parcours, mais de confort différent.

### **3.6.2 - Fiabilité des temps de parcours**

Il convient de noter que l'on peut intégrer un paramètre relatif à la fiabilité des temps de parcours dans la formulation du coût généralisé. Par ailleurs, il est important de signaler que la valeur du temps de retard est généralement plus élevée que la valeur du temps en situation normale. Pour plus de détails, le lecteur est invité à se reporter à la partie Prise en compte de la fiabilité dans le coût du temps de transport de ce rapport et au rapport du Sétra sur les éléments de valorisation économique de la fiabilité des temps de parcours.

## 3.7 - Limites

Le coût généralisé est un concept relativement bien adapté pour le transport de personnes, très insuffisant pour le fret. En effet, en ce qui concerne le fret, outre le coût monétaire, le temps de parcours n'est pas le seul critère (ou le critère principal) dans le choix du mode ou de l'itinéraire, en particulier parce que le chargeur ne maîtrise pas le trajet de sa marchandise : il achète un service, c'est-à-dire la livraison d'un bien à une date prévue et à un coût déterminé. Le trajet est assuré par le transporteur, voire par le commissionnaire chargé de la définition de la chaîne logistique. Le critère prépondérant est la fiabilité de la chaîne logistique (ponctualité, régularité, gestion efficace des ruptures de charge) et sa souplesse (possibilité d'adaptation aux aléas du transport).

### 3.7.1 - Importance du modèle de trafic sur la valeur du temps

Les calculs de rentabilité reposent sur des modèles de trafic, et on obtient donc des valeurs du temps qui diffèrent selon le modèle utilisé. Il faut donc utiliser un même modèle pour hiérarchiser les projets d'un même mode et il faut que les pratiques de paramétrages de modèles soient harmonisées.

### 3.7.2 - Valeur du temps, confort, qualité de service et choix modal

La distinction sur ce qui est compris dans la valeur du temps et dans le malus d'inconfort est difficile à déterminer car de très nombreux couples (valeur du temps, malus d'inconfort) peuvent représenter de manière satisfaisante les comportements réels constatés sur des enquêtes. Cependant, bien que la réalité soit bien représentée par ces couples, on ne distingue pas exactement ce qui est compris dans la valeur du temps et ce qui est compris dans le malus d'inconfort (confort matériel, place disponible, services et informations disponibles pendant le trajet, sentiment de sécurité, exigences attentionnelles pour la conduite, ...). On ne valorise pas non plus explicitement les activités effectuées pendant le trajet, ou l'impact d'une rupture du temps de parcours sur la valeur du temps.

Cependant, ces éléments de confort (de l'infrastructure, mais également à bord du véhicule) et la question de l'"utilisation" des gains de temps est prise en compte de façon indifférenciée dans les différentiels d'utilité, ou constantes, qu'ils soient spécifiques à un mode (malus d'inconfort par exemple), ou non (constantes modales). Une complexification des fonctions d'utilité permettrait de quantifier ces gains, quand les données supplémentaires sont disponibles. Cependant, même en l'absence de modèles suffisamment précis, ces gains peuvent théoriquement être pris en compte à travers les calculs de surplus directement issus des modèles.

### 3.8 - Références réglementaires et bibliographiques

- Projet d'instruction relative aux méthodes d'évaluation économique des investissements routiers interurbains de mai 2007, Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du territoire, du Tourisme et de la Mer
- Instruction cadre relative aux méthodes d'évaluation économique des grands projets d'infrastructures de transport, mars 2004 (mise à jour en mai 2005), Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du territoire, du Tourisme et de la Mer
- Modélisation des déplacements urbains de voyageurs, Guide des pratiques, CERTU, 2003
- Recommandations pour l'évaluation socio-économique des projets de TCSP, CERTU, 2002
- Transports : choix des investissements et coût des nuisances, Rapport dit « Boiteux 2 », Commissariat Général du Plan, 2001
- Projet d'instruction relative aux méthodes d'évaluation socio-économique des projets ferroviaires, version du 20 décembre 2006
- Les outils d'évaluation des projets routiers, d'Ariane à TransCAD, Rapport d'études, SETRA, 2010
- Comparaison des coûts de passage portuaire en Europe en 2007, CTS, 2008
- Fiabilité des temps de parcours, Éléments de valorisation économique, Rapport d'études, SETRA, 2012,
- Modèles de trafic routier, Influence des composantes du niveau de service (temps, péage, confort, ...) sur le choix d'itinéraire, Rapport d'études, SETRA, 2012

## 4 - Trafic induit

### 4.1 - Eléments de définition et enjeu

Lorsque l'on améliore la qualité d'un itinéraire (augmentation de la capacité, réduction des temps de parcours, augmentation de la fiabilité des temps de parcours...), le coût de l'itinéraire pour l'utilisateur est diminué. Cette diminution de coût profite d'une part aux usagers qui empruntaient cette infrastructure avant son amélioration et influe d'autre part sur les usagers qui n'utilisaient pas cet itinéraire auparavant. En effet, compte tenu de la diminution du coût de l'itinéraire, il est possible que celui-ci soit à présent plus avantageux pour ces derniers et qu'ils modifient en conséquence leurs comportements de mobilité. Un nouvel équilibre se crée.

Ceci est notamment mis en évidence par des comptages sur coupure avant et après mise en service d'une infrastructure ou suite à l'amélioration d'une infrastructure existante qui font apparaître des différences, inexplicables, entre les prévisions et les trafics observés

On peut noter qu'il est également possible de parler de désinduction de trafic, c'est-à-dire que lorsque la capacité de l'infrastructure est réduite, la demande de trafic diminue.

La question de la quantification de ces usagers est importante car ils peuvent, selon les cas, représenter une part non négligeable des trafics sur l'itinéraire amélioré. Ne pas prendre en compte le trafic induit conduit d'une part à un sous-dimensionnement de l'infrastructure et d'autre part à un biais dans les évaluations socio-économiques et financières qui sont en effet en partie dérivées des études de trafics.

### 4.2 - Composantes du trafic induit

Le trafic induit est composé de différents termes qui correspondent chacun à un changement de comportement des usagers. On distingue généralement les modifications de comportement à court et à long terme.

#### 4.2.1 - Court terme

En ce qui concerne le court terme, les composantes principales du trafic induit correspondent à ce que l'on appelle la "triple convergence" qui recouvre les notions de convergence spatiale, convergence modale et convergence horaire.

- la convergence spatiale consiste en un changement d'itinéraire. Cette modification d'itinéraire conduit à une modification des distances parcourues, celles-ci pouvant être rallongées ou raccourcies ;
- la convergence modale consiste en un report vers le mode routier et une diminution du taux d'occupation des véhicules : des usagers qui utilisaient les transports collectifs pour éviter la congestion se reportent vers la voiture ;
- la convergence temporelle consiste en un changement d'horaire de déplacements, il s'agit principalement d'un report vers l'heure de pointe, les usagers évitaient auparavant cette période particulièrement congestionnée.

Ce phénomène de triple convergence est la résultante de réajustements des comportements des usagers – "quand, comment et où voyagent les personnes" – suite à l'augmentation de la capacité d'une infrastructure congestionnée. Il convient en outre de noter que la convergence triple s'effectue à l'origine et à la destination du déplacement fixe.

D'autres effets à court terme peuvent se manifester :

- La modification de la destination pour un déplacement qui avait déjà lieu : sur le court terme, il y a modification de la destination du déplacement sans modification de l'occupation des sols. Ce phénomène correspond plutôt aux déplacements ayant pour motif des activités non contraintes et qui peuvent donc avoir lieu à différentes localisations (c'est en particulier le cas pour les motifs achats et loisirs).
- L'augmentation de la fréquence de déplacements : lorsque les coûts diminuent, il est possible de voyager plus fréquemment pour un même budget. Ceci comprend à la fois des augmentations de fréquence pour une origine destination (OD) donnée, des destinations supplémentaires et des changements de structure des boucles de déplacements.

Ces deux phénomènes de court terme peuvent également être appréhendés en référence à la conjecture de Zahavi : "les déplacements de la vie quotidienne se font à budget-temps constant et leur portée spatiale est une fonction de la vitesse de déplacement", en d'autres termes, l'amélioration des conditions de circulation permet donc d'aller plus loin et/ou d'(y) aller plus souvent.

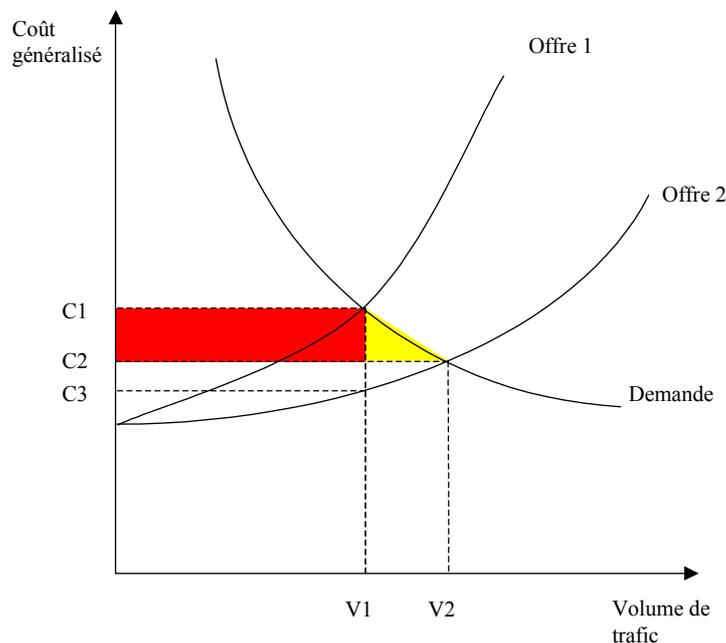
- L'expression d'une demande « latente » ou voyage « latent ». La demande latente correspond à des voyages qui auraient lieu dans des conditions optimales mais qui n'ont pas lieu à cause de la congestion routière, des coûts de transport... En d'autres termes, la demande de déplacement existait en amont de l'augmentation de la capacité de l'infrastructure mais ne pouvait pas être satisfaite compte tenu de l'état du système de transport. Lorsque cet état est modifié, la demande peut être satisfaite, il y a augmentation de la mobilité.

#### 4.2.2 - Long terme

A long terme, d'autres modifications des comportements des usagers peuvent se manifester. Il est généralement admis que les effets de long terme sont plus importants en terme de volume des flux concernés que les effets de court terme. On peut ainsi observer une transformation de l'occupation des sols, des modifications dans les choix de destination et une augmentation de la dépendance à l'automobile.

- modification de l'occupation des sols : l'amélioration du système de transport permet aux ménages de se localiser plus loin de leur lieu de travail, les entreprises peuvent se relocaliser
- modification des choix de destination : il s'agit sur le long terme de modifications de destination qui concernent plutôt les motifs contraints tels que le lieu de travail ou le lieu d'étude des usagers. Ce phénomène est également lié à la modification de l'occupation des sols.
- dépendance à l'automobile : l'augmentation de l'offre routière conduit à une augmentation de l'utilisation de la voiture et par conséquent à une diminution de l'usage des transports collectifs. Faut de demande, l'offre en transport en commun est réduite voire disparaît. Les usagers sont dès lors contraints d'utiliser la voiture et la congestion augmente. Il est donc possible qu'une augmentation de la capacité d'une infrastructure conduise à une dégradation des conditions de circulation. C'est ce que l'on appelle le « paradoxe de Downs-Thomson ».

### 4.3 - Représentation graphique



La loi de l'offre et de la demande est illustrée sur la figure ci-dessus pour une infrastructure donnée. L'axe des ordonnées correspond au coût généralisé de circulation sur une infrastructure et l'axe des abscisses correspond au volume de trafic qui circule sur cette infrastructure. La courbe de demande correspond au volume de demande de transport en fonction du coût généralisé de l'infrastructure. La droite Offre 1 correspond au coût de circulation sur l'infrastructure avant modification de cette dernière en fonction du volume de transport circulant sur cette infrastructure. La courbe Offre 2 correspond au coût de circulation sur l'infrastructure après amélioration en fonction du volume de transport circulant sur cette infrastructure.

Avant amélioration de l'infrastructure, le volume de trafic sur l'infrastructure était V1 avec un coût de circulation C1. Si l'on ne prend pas en compte le trafic induit, c'est-à-dire si le volume de trafic reste inchangé sur l'infrastructure, le coût de circulation suite à l'amélioration de l'infrastructure est C3, inférieur à C1. Cependant, comme la demande de transport est élastique, un abaissement des coûts de circulation conduit à l'augmentation de la demande pour cette infrastructure. Un nouvel équilibre se crée avec un coût de circulation C2 pour un volume de trafic V2. Le trafic induit correspond à la différence entre V2 et V1.

Schématiquement, en comparant la situation de référence (de coût C1 et de volume de trafic V1) et le scénario d'aménagement (coût C2 et volume de trafic V2), le surplus des usagers est donné par :

$$Surplus = V1 (C1 - C2) + (V2 - V1) \frac{(C1 - C2)}{2}$$

La valorisation socio-économique du trafic induit est donc :

$$Surplus_{induit} = (V2 - V1) \frac{(C1 - C2)}{2}$$

Ceci correspond à l'aire jaune sur la figure.

Il convient de noter que, si la notion d'équilibre entre offre et demande est fondamentale, le système considéré est en réalité un système en évolution constante car la réponse des usagers à une modification de l'offre n'est

jamais instantanée. Le retour à un équilibre suite à une modification de l'offre peut nécessiter de quelques mois à plusieurs dizaines d'années. Cependant, de manière générale, il est supposé que le système étudié à un instant donné correspond tout de même à un équilibre.

## 4.4 - Élasticité de la demande de trafic

L'élasticité est le phénomène résultant d'une sensibilité de la demande à l'évolution des conditions de l'offre. Il évalue la propension du niveau de demande à s'ajuster en fonction de l'offre. L'élasticité se mesure par rapport à une composante de l'offre.

L'élasticité (par exemple ci-dessous l'élasticité du volume de trafic au coût de circulation), est égale au pourcentage de modification de la demande par rapport au pourcentage de modification de l'offre. Elle se calcule de la manière suivante :

$$e = \frac{\% \Delta V}{\% \Delta C} = \frac{\frac{V2 - V1}{V1}}{\frac{C2 - C1}{C1}}$$

Les méthodes qui s'appuient sur l'utilisation d'élasticités pour estimer le trafic induit doivent être utilisées avec précaution. Le trafic induit est en réalité très difficilement mesurable et quantifiable. L'application d'une élasticité semble, par expérience, surestimer le trafic induit. Le modélisateur doit donc avoir connaissance de ces limites lors de l'utilisation de ces formules et doit justifier de leur utilisation ou non, et indiquer, le cas échéant, la valeur d'élasticité retenue pour modéliser le trafic induit.

En effet, ces méthodes permettent d'estimer des volumes de trafic induit sans différenciation des différents phénomènes qui composent le trafic induit. Or les modèles de trafic utilisés actuellement permettent de bien prendre en compte certains de ces phénomènes : notamment la convergence spatiale, la convergence modale et dans certains cas la convergence temporelle. Il y a donc un risque de double compte.

## 4.5 - Modélisation du trafic induit

En pratique, les différentes réflexions semblent aller dans la direction d'un enrichissement des modèles pour intégrer plusieurs types de trafics induits (fréquence de voyages, augmentation des longueurs de déplacement...).

Ainsi, plutôt que d'appliquer directement une élasticité mesurée par telle ou telle étude, il semble préférable en amont de l'étude de prévision de trafic à proprement parler d'identifier les possibles sources de trafics induits qui pourraient avoir une influence sur le projet. Ainsi, dans un contexte urbain très congestionné à forte concurrence modale, il semble nécessaire d'inclure un modèle de choix modal, un modèle de fréquence et un modèle de choix de période horaire de départ.

Nous pouvons également citer, bien qu'actuellement plutôt au stade de recherche que de modèle appliqué, les modèles prenant en compte l'interface transport-urbanisme (modèles LUTI) qui tentent, en complément de la classique variation de réseau, de prendre en compte les changements de l'occupation des sols (c'est-à-dire la localisation de la demande).

## 4.6 - Bibliographie

- L'induction de trafic, Revue bibliographique, Rapport d'études, SETRA, 2012
- Guide des études de trafic interurbain, Guide méthodologique, SETRA, 1992
- Guide sur le calage et la validation des modèles de trafic – Techniques appliquées à l'affectation routière interurbaine, Guide Méthodologique, SETRA, 2010
- Modélisation des déplacements urbains de voyageurs - Guide des pratiques, Guide méthodologique, CERTU, 2003
- Comportements de déplacement en milieu urbain : les modèles de choix discrets - Vers une approche désagrégée et multimodale, CERTU, Juin 1998.

## 5 - Accessibilité

La notion et la représentation de l'accessibilité ou desserte des territoires et des services par les infrastructures de transport est au cœur des réflexions actuelles sur l'impact socio-économique des projets.

Les études d'accessibilité peuvent servir divers objectifs : diagnostic du fonctionnement d'un territoire, d'un système de transport, de la desserte d'un pôle particulier, analyse des effets d'une politique ou d'un projet de transport, comparaison de projets de transport ou de variantes.

Un large panel d'indicateurs et de méthodes d'analyses allant de critères simples, comme l'analyse de temps d'accès à un pôle, à des critères complexes d'accessibilité potentielle croisant données socio-économiques et performance du réseau de transport, permet d'apprécier l'accessibilité.

Les indicateurs d'accessibilité sont à l'interaction entre les dimensions spatiale et temporelle. L'accessibilité à un territoire n'a de sens que si ce dernier recèle un minimum de "contenu", d'enjeux, qu'il s'agisse de personnes, de biens, de services, et qui constituent en règle générale la raison même du déplacement : se rendre en un lieu pour trouver du travail, pour rencontrer des amis, pour faire des achats ou pour visiter des sites touristiques, ... Un territoire très accessible mais particulièrement vide ne constitue pas de réelle opportunité au plan économique. Un territoire accessible et riche en emplois, en main d'œuvre, en opportunités de toutes sortes, constitue au contraire un réel intérêt économique. Cette association accessibilité-richesse, appelée aussi accessibilité potentielle peut se décliner de diverses manières dont on trouvera ici quelques exemples illustratifs.

La démarche de calcul dépend assez fortement de l'objectif qui est fixé : elle sera différente selon qu'il s'agit d'établir un simple diagnostic de fonctionnement ou de faire une comparaison de variantes de transport. Les diagrammes qui sont présentés ci-après sont adaptés au cas de comparaisons de projets ou de variantes. Ils peuvent être utilisés dans le cas d'un diagnostic de territoire, on s'arrêtera alors à l'étape "situation actuelle".

La démarche comporte à chaque fois trois ou quatre étapes classiques : diagnostic, calcul d'accessibilité en situation de référence, calcul d'accessibilité en situation de projet, note de synthèse. Le calcul d'accessibilité peut être plus ou moins complexe, selon les indicateurs utilisés et l'objectif recherché. Le croisement des indicateurs basiques (temps, coûts, ...) avec des données socio-économiques rend par exemple le calcul plus complexe.

### 5.1 - Les indicateurs couramment utilisés

#### 5.1.1 - Séparation spatiale : la distance comme simple mesure de l'accessibilité

La mesure de l'accessibilité considérée comme la plus intuitive est celle où seule la distance (séparant les différents lieux) est prise en compte. Cette mesure ne considère donc pas le niveau d'attraction du territoire.

La distance peut se révéler être un indicateur utile pour juger par exemple de l'homogénéité d'un réseau sur un territoire donné (équi-répartition des infrastructures autour d'un point donné ou au contraire hétérogénéité de la couverture). Elle peut également rendre compte du relief ; les courbes iso-distances peuvent alors s'apparenter à des courbes de niveaux, sachant que plus le relief sera fort, plus les arcs seront longs pour de faibles distances "vol d'oiseau".

*NB : La distinction distance "à vol d'oiseau" - distance réelle est importante, car il existe en général une différence sensible entre la distance réelle obtenue en calculant les longueurs successives des éléments de réseau empruntés par un usager et la distance dite "à vol d'oiseau".*

Le recours à l'indicateur "distance" est très utilisé pour les analyses de la géographie des réseaux. Pour caractériser le degré de connexion d'un nœud au reste du réseau on utilise notamment un indicateur de **Shimbel**.

Il caractérise l'accessibilité d'un point à un ensemble de pôles ou de plusieurs points à un ensemble de pôles selon le critère distance : on pourra par exemple s'intéresser à une ville et à ses "plus proches voisins", c'est-à-dire villes avec lesquelles elle est directement connectée via le réseau de transport.

La formule utilisée est la suivante :

$$A(G)_i = \sum_{j=1}^N dij \quad (1)$$

Avec  $A(G)_i$  = l'accessibilité géographique d'un endroit  $i$ .

$d_{ij}$  = la distance entre l'endroit  $i$  et l'endroit  $j$  en passant par le chemin le plus court.

$n$  = le nombre d'endroits.

Une formulation alternative de cette mesure de l'accessibilité est d'intégrer des facteurs de résistance à la distance. Ces facteurs de résistance peuvent être le nombre de zones dans l'aire étudiée, ou l'importance du budget des ménages... Elle prend alors la forme suivante :

$$A_i = \sum_j A_{ij} = \sum_j f(d_{ij}) \quad (2)$$

avec  $A_{ij}$  l'accessibilité de la zone  $j$  à la zone  $i$ ,  $f(d_{ij})$  est une fonction de résistance et  $d_{ij}$  est la distance entre les zones  $i$  et  $j$ . Cette distance peut être appréhendée de différentes manières soit :

- du nombre de nœuds ou d'arcs, on parle de distance "physique"
- du temps de transport calculé ou révélé, distance "temporelle"
- du coût monétaire et du coût temporel, coût généralisé du déplacement

Cette fonction de résistance peut être remplacée par un paramètre de pondération de la distance. L'équation (2) s'écrit alors comme suit :

$$A_i = \sum_j w_{ij} d_{ij} \quad (3)$$

avec  $A_i$  est l'accessibilité depuis la zone  $i$ ,  $w_{ij}$  un indice de pondération et  $d_{ij}$  est la distance entre les zones  $i$  et  $j$ .

Ces différentes mesures de l'accessibilité par la distance peuvent être déclinées dans le tableau suivant afin d'avoir un aperçu :

Auteur	Formulation	Signification
Savigear (1967)	$A_i = \frac{\sum_j g_{ij}}{\sum_j g_{ij} t_{ij}}$	$g_{ij}$ = mesure de la demande de déplacement entre les zones $i$ et $j$ $t_{ij}$ = temps de trajet entre les zones $i$ et $j$
Ingram (1971)	$A_{ij} = 100 \cdot e\left(-\left(d_{ij}^2 \cdot v^{-1}\right)\right)$	$v$ = distance moyenne au carré entre tous les points
Guy (1983)	$A_i = \frac{\sum_k d_{ij(k)} E_k}{\sum_k E_k}$	$d_{ij(k)}$ = distance euclidienne d'un magasin $j$ dans lequel le bien $k$ est disponible $E_k$ = dépense moyenne par ménage en bien $k$
Allen, Liu et Singer (1993)	$A_{total} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \sum_{j=1}^N a_{ij}$	$A_{total}$ = toutes les accessibilités pour une aire $a_{ij}$ = temps de trajet entre les lieux $i$ et $j$
Jiang, Claramunt et Batty (1999)	$A_i = \sum_j w_{ij} d_{ij}$	$A_i$ = l'accessibilité depuis la zone $i$ $w_{ij}$ = indice de pondération $d_{ij}$ = distance entre les zones $i$ et $j$ .

### 5.1.2 - Temps de parcours

Le temps de parcours, exprimé en minutes ou en heures, selon le cas, est relativement facile à saisir par la grande majorité des interlocuteurs. Il peut se décliner selon différents modes d'utilisation.

- Depuis/vers 1 pôle, en monomodal : on calcule tous les points accessibles par un réseau donné en un temps maximum donné. Le temps de parcours peut concerner le mode routier, le mode TC routier, le ferroviaire, l'aérien, ... La représentation cartographique permet de mettre en évidence les zones encore enclavées par rapport à ce pôle, et où l'accessibilité est réduite du fait d'un manque d'infrastructures.
- Depuis/vers ... n pôles, en monomodal : on définit un ensemble de pôles/nœuds du réseau de transport (par exemple : ports, échangeurs autoroutiers, ...). Puis on calcule les points du territoire accessibles à partir de n'importe lequel de ces nœuds en un temps maximum donné. Ceci permet d'obtenir la qualité de desserte du territoire par un mode, et ainsi de révéler les parties de territoire les moins bien desservies par le mode en question.

Utilisation de l'indicateur temps en mode ferroviaire, Transport en Commun Urbain (TCU) et aérien :

Ces modes ne proposant généralement pas de trajet « direct » de point origine à point de destination, on est tenu de calculer, outre le temps de trajet proprement dit, un temps d'accès à la gare ou à l'aéroport, un temps d'attente (qui est fonction de la fréquence), ainsi qu'un temps de destination final. Les temps d'accès et à destination sont fonction du mode d'accès et du mode final. Il pourra s'agir d'un temps routier, d'un temps en mode TCU, un temps "marche-à-pied", voire une combinaison de ces divers temps.

- Notion de "temps de parcours à vide" et "temps de parcours en charge"

Les temps utilisés dans les calculs d'accessibilité sont le plus souvent issus de bases de données établies à partir de "vitesses moyennes" à vide ; c'est notamment le cas des bases du commerce (Navteq, Teletlas, bases IGN, ...). Ceci conduit, lorsque le calcul d'accessibilité porte sur des réseaux ou des portions de réseaux très sollicités, notamment à certaines heures de la journée, à sous-estimer ces temps, et à donner une image de l'accessibilité plutôt avantageuse. Des différences significatives apparaissent en particulier en milieu urbain (transports individuels ou collectifs routiers), ainsi qu'en interurbain lors de pointes significatives (départs de week-ends, pointes estivales, ...).

L'intégration de la charge du réseau routier, en nombre de véhicules par jour moyen ou à l'heure de pointe peut se faire à l'aide de logiciels d'affectation de trafic ; ces logiciels permettent de calculer les charges des tronçons, ainsi que la vitesse en charge, et par conséquent les temps de parcours. La relation entre trafic et vitesse renvoie à la notion de "courbes débit-vitesse", couramment utilisées dans les logiciels d'affectation de trafic.

- Notion de "temps possible à destination de ... "

Le temps dans l'absolu n'est pas toujours représentatif de l'accessibilité, notamment dans le mode TC. Ce dernier implique généralement des horaires, des fréquences, la notion de "temps disponible à destination de" permet de rendre compte du niveau de performance réelle du mode.

NB : Les conditions d'accessibilité entre deux points d'un territoire donné varient également fortement selon le moment de la journée ou l'époque de la semaine, du mois, ou de l'année. Par exemple, pour une accessibilité routière, on peut déterminer une accessibilité "moyenne", rapportée au "jour moyen annuel", correspondant à un trafic représentatif du trafic "moyen" de l'année ; il n'en va plus de même en période de pointe (pointe d'été, retours de migrations estivales, ...). De même, en milieu urbain ou péri-urbain, on parlera d'accessibilité "à la journée", d'accessibilité "à l'heure de pointe du matin ou du soir". Pour le ferroviaire, on devine que du fait des horaires des trains, on n'aura pas les mêmes résultats selon les heures de la journée où l'on se situe. Il est donc important de préciser le moment ou l'époque du calcul. Ceci est d'autant plus vrai lorsque l'on fait des comparaisons de variantes de transport : on doit les faire "toutes choses égales" (mêmes lieux, mêmes époques).

### 5.1.3 - Coût généralisé

L'avantage d'utiliser l'indicateur "temps" reste sa grande simplicité : c'est un indicateur "parlant", facile à interpréter par un public même néophyte. En contrepartie, il ne suffit pas à donner une idée globale de

l'accessibilité, laquelle doit intégrer d'autres notions telles que : la pénibilité du parcours, le coût du trajet, le coût du temps passé, ... D'où l'introduction d'un indicateur plus représentatif, le "coût généralisé", qui présente en outre l'avantage de permettre des comparaisons plus justes entre modes. Se référer à la partie Coût généralisé et valeur du temps.

### 5.1.4 - Les opportunités cumulées ou mesures isochrones

Cette mesure des opportunités cumulées peut être considérée comme la plus simple des mesures de l'accessibilité puisqu'elle prend en compte en même temps la distance et l'objectif du déplacement. La majorité de ce type de mesure associe le coût du déplacement et les opportunités atteintes. Sa formulation est la suivante :

$$A_i = \sum_j W_j a_j$$

avec  $A_i$  l'accessibilité depuis la zone  $i$ ,  $a_j$  les opportunités de la zone  $j$ , et  $W_j$  un paramètre qui peut prendre les valeurs suivantes :  $W_j = 1$  si  $c_{ij} \leq c_{ij}^*$  et  $W_j = 0$  sinon, avec  $c_{ij}$  une mesure de coût entre les zones  $i$  et  $j$  et  $c_{ij}^*$  est le seuil de coût au-delà duquel les opportunités ne sont plus comptabilisées<sup>1</sup>.

Il est toutefois difficile d'avoir une interprétation précise dans la mesure où une variation d'accessibilité peut venir à la fois d'une évolution du nombre d'opportunités atteintes et à la fois d'une variation du temps de déplacement. En effet, ces mesures ne déterminent pas le ratio opportunités/distance mais le nombre d'opportunités atteintes. En outre si la contrainte distance se desserre alors l'accessibilité augmente. De plus, ce type de mesure attribue une pondération identique à toutes les opportunités d'une zone.

### 5.1.5 - Les mesures gravitaires

Les mesures dites gravitaires sont apparues dès les années 1950. En 1959 Hansen pose les fondements pour utiliser la théorie gravitaire pour mesurer l'accessibilité aux opportunités. Selon Hansen, l'accessibilité est considérée comme une mesure de la séparation spatiale des activités autour d'un point, ajustée par la capacité et la volonté des individus de franchir cette barrière spatiale.

Intuitivement, un indicateur intéressant de l'accessibilité peut être la variété de choix ou le nombre de destinations offertes pour satisfaire un besoin.

L'accessibilité gravitaire apparaît donc comme le produit de deux facteurs antagonistes qui sont la présence d'opportunités (telle que les emplois, les commerces, les loisirs), qualifiée "d'éléments moteurs du déplacement" et le coût du déplacement (distance, temps ou coût généralisé) qualifié comme l'élément résistant du déplacement". On peut représenter la forme de l'accessibilité gravitaire de la manière suivante :

$$A_i = \sum_j D_j f(c_{ij})$$

avec  $A_i$  l'accessibilité depuis la zone  $i$ ,  $D_j$  l'attractivité de la zone  $j$ , qui correspond généralement aux opportunités présentes dans la zone  $j$  ou au nombre de destinations situées dans la zone  $j$  susceptibles de satisfaire le besoin considéré et  $f(c_{ij})$  une fonction de résistance au coût de déplacement.

Ainsi, il y a trois principaux composants du modèle gravitaire que les chercheurs traitent différemment qui sont :

- La caractérisation des attractivités de la zone (emplois, loisirs, commerces, parcs naturels): les  $D_j$  Lorsque l'on cherche l'accessibilité à l'emploi, l'attractivité de la zone est souvent quantifiée par le nombre d'emplois de la zone .

---

<sup>1</sup> Certaines mesures du type isochrone font peser la contrainte sur le nombre d'opportunités à atteindre et calculent le temps, la distance ou le coût pour les atteindre.

- La mesure du déplacement-la séparation spatiale-entre les zones (temps ou distance): les  $c_{ij}$ . Concernant la séparation spatiale, plusieurs méthodes peuvent être retenues : distance euclidienne, distance réseau, temps de trajet, coût du trajet .
- La forme de la fonction de résistance du déplacement  $f$ . La question qui fait le plus débat dans la communauté scientifique est celle sur le choix de la fonction de résistance. La majorité des études utilisent soit une fonction puissance soit une fonction exponentielle. Le choix entre ces deux fonctions peut se faire autour de 4 points principaux :
  - La comparabilité des paramètres
  - La croissance attendue des coûts
  - Le comportement des deux fonctions lorsque le coût tend vers 0
  - La question de l'agrégation des déplacements individuels

Selon la littérature académique, une conclusion entre le choix de ces deux fonctions se dessine : la fonction puissance semble plus pertinente lorsque les déplacements sont longs alors que pour les déplacements "courts" la fonction exponentielle paraît être la mieux. Ainsi, si l'on traite des déplacements urbains (courte distance) on utilisera une fonction de résistance de forme exponentielle alors que pour des déplacements inter-urbains l'utilisation de la forme puissance paraît être la mieux adaptée.

### L'accessibilité au sens de l'instruction DGR de 2007 : un exemple de mesure gravitaire

Dans l'annexe 13 de cette instruction, on croise le coût généralisé du déplacement avec la quantité de biens ou de services de la zone que l'on cherche à atteindre. L'accessibilité s'écrit alors :

$$A_i = \sum_j Q_j e^{-\alpha t_{ij}}$$

Avec J : l'ensemble des destinations accessibles y compris la zone i

$Q_j$  : quantité de biens ou services présents dans la destination j

$e^{-\alpha t_{ij}}$  : coefficient d'éloignement

$t_{ij}$  : temps de parcours entre i et j

$\alpha$  prend des valeurs différentes selon le motif et dépend de la zone d'étude. Il doit être déterminé à partir d'enquêtes permettant de mesurer l'élasticité au temps des usagers de la zone.

La comparaison des valeurs d'indice d'accessibilité de chaque zone permet d'identifier les secteurs tirant le meilleur bénéfice de l'aménagement.

On peut définir et calculer un indicateur global, représentatif de l'ensemble du périmètre, par sommation des accessibilités de chaque zone :  $A = \sum_i A_i$ . Ce calcul se fait pour plusieurs situations possibles d'aménagement, ou de transport ; il permet de comparer des scénarios d'aménagement à une situation de référence et donc des scénarios entre eux.

#### 5.1.6 - Accessibilité à un "panel de biens"

Cette notion a été développée notamment dans le cadre d'une thèse présentée par D. Caubel pour répondre à une lacune concernant l'évaluation économique : les outils d'évaluation, utilisés en France pour éclairer les décideurs sur les politiques de transports en milieu urbain, n'intègrent pas pleinement la dimension sociale de ces politiques. La thèse propose entre autres, à l'issue d'un travail de connaissance sur le tissu social d'une grande agglomération - Lyon - la construction d'un indicateur d'accessibilité à un panel de biens.

Cet indicateur mesure, pour un mode de déplacement donné, pour chaque service du panel de biens et depuis le lieu de résidence, le temps maximal d'accès au nombre d'activités pour 1 000 habitants. Le temps d'accès au "panel de biens" est le temps qu'il faut pour couvrir une surface disposant d'une densité de services équivalente à la moyenne sur l'agglomération.

### 5.1.7 - Mesures fondées sur l'utilité

Ces mesures fondées sur l'utilité viennent de la théorie économique et plus précisément des fondements de la microéconomie. Cette mesure interprète l'accessibilité comme le résultat d'un choix individuel parmi un ensemble d'alternatives de déplacement (de transport). Autrement dit, pour les économistes, l'accessibilité est l'utilité espérée maximale d'une alternative choisie par l'individu. Cette mesure de l'accessibilité dépend donc des alternatives disponibles et de leur perception par les individus.

#### Exemple : calcul des performances économiques et naturelles d'un territoire

Le calcul de la performance d'un territoire est fondé sur la théorie rappelée dans l'annexe 2 de l'instruction cadre du 25 mars 2004. Il est rappelé que cette théorie est adaptée aux contextes urbains mais que son applicabilité en interurbain n'est pas démontrée. Elle consiste à établir des cartes de "gain de performance" liées à la réalisation d'une infrastructure nouvelle. Ces gains peuvent concerner aussi bien les déplacements de type "domicile-travail" que "loisirs" (accès à un site de loisirs, à un espace vert, ...). Cette approche, qui associe largement les indicateurs "simples" liés à l'amélioration du niveau de service (temps, coût généralisé) et les valeurs socio-économiques (emplois, actifs, espaces verts, ...), repose sur l'idée qu'un accroissement d'accessibilité, à temps de transport équivalent, permet d'embrasser un choix de destinations supplémentaires, qui se traduit par un surplus économique :

"La diversité des destinations d'activités et d'affaires, au sein de l'espace accessible quotidiennement dans un temps de transport constant, est source d'efficacité économique et de productivité. Si l'on considère les déplacements liés au travail, un large marché d'employés permet à un actif de valoriser sa formation professionnelle ; inversement, un large marché d'actifs permet à l'employeur d'organiser efficacement son entreprise. Plus le marché des emplois et des actifs accessibles s'élargit, plus la productivité des hommes et des entreprises pouvant accéder à ce marché s'améliore". Cependant, de tels gains peuvent être représentés par les gains de temps révélés, ou les surplus directement sortis des modèles dans le cadre d'une modélisation à quatre étapes notamment (voir la partie Coût généralisé et valeur du temps).

### 5.1.8 - Les mesures "time-geography"

L'accessibilité est analysée à partir de contraintes spatiales et temporelles que l'individu rencontre pour réaliser une activité. Dans cette mesure de l'accessibilité les contraintes spatiales et temporelles sont considérées équivalentes. Des prismes spatio-temporels sont utilisés pour représenter les itinéraires des individus dans l'espace et le temps. Ces prismes spatio-temporels peuvent être considérés comme des mesures de l'accessibilité, c'est-à-dire qu'ils donnent les opportunités des zones potentielles lesquelles peuvent être obtenues par la contrainte temps prédéfinie.

Les inconvénients de ce type de mesures sont leur degré de désagrégation. En effet, obtenir le budget-temps des individus et leurs contraintes demande beaucoup de données. Les applications de ce type de mesure sont souvent restreintes à de petites régions et sur un petit échantillon de population car le coût en information est très élevé. Un autre inconvénient des mesures "time-geography" est qu'elles se focalisent sur le côté de la demande, c'est-à-dire que les mesures montrent les possibles relations espaces-temps entre les localisations possibles des activités sous une contrainte de temps.

## 5.2 - Limites méthodologiques

Elles concernent à la fois le processus de calcul de l'accessibilité et sa représentation.

### 5.2.1 - Limites sur le mode de calcul

Les logiciels utilisés sont en général suffisamment puissants pour les études. Cependant, dans certains cas concernant le milieu urbain ou périurbain, la précision des données (réseau, zonage) est parfois trop réduite pour rendre compte de la réalité, ce qui introduit des biais dans le calcul ;

Le géo-référencement est lui aussi entaché d'imprécision : position approximative d'un site, d'un arrêt, d'un centroïde, ... Cela peut parfois suffire à biaiser un calcul de manière significative ;

Les hypothèses prises pour caractériser les réseaux et leur utilisation (paramétrage des fonctions de temps, de coût, ...) ou celles utilisées pour le calcul des temps de rabattement (en l'absence d'enquêtes spécifiques) peuvent conduire à des inexactitudes ;

Certains éléments d'une chaîne de déplacement ont pu être omis (par exemple : la marche à pied depuis le domicile vers l'arrêt TC, ou entre 2 correspondances, ...) ;

Le choix de la période de la journée, voire de la semaine, du mois ou de l'année elle-même peut avoir un impact sensible sur le résultat d'un calcul ; de même, l'utilisation des "temps à vide" (temps de parcours correspondant à une circulation à la vitesse maximale autorisée) ou des "temps en charge" (temps de parcours correspondant à la vitesse possible sur le réseau compte tenu du flux de véhicules qui s'y trouvent) ne donne pas du tout les mêmes résultats

### 5.2.2 - Limites concernant la représentation

La précision de la représentation influence directement la manière dont sont interprétés les résultats du calcul. Par conséquent, mieux vaut s'attacher à définir une représentation qui soit la plus fidèle possible. Cependant, la précision d'une représentation est liée à celle des données entrées dans le logiciel de calcul ; il arrive souvent par exemple que le tracé des courbes isochrones, ne soit qu'un simple trait rectiligne entre deux points, faute de données intermédiaires, ce qui est faux dans la réalité.

Le choix d'une présentation graphique complexe par les gammes chromatiques et les échelles de représentation retenues, peut induire parfois une certaine incompréhension pour le lecteur.

## 5.3 - Références bibliographiques

- Calculs d'accessibilité - Impact des spécifications du réseau routier sur les calculs d'accessibilité : données, sources, méthodes, Rapport d'études, CERTU, 2006
- Observation de la mobilité et des dynamiques urbaines – Indicateurs d'accessibilité à l'emploi dans les aires urbaines, Rapport d'études, CERTU, 2007
- Évaluation des chaînes intermodales de transport: l'agrégation des mesures dans l'espace et le temps, Actes du colloque Technological Innovation for Land Transportation (TILT) tenu à Lille du 2 au 4 décembre 2003, CHAPELON L., 2003
- Politique de transports et accès à la ville pour tous ? Une méthode d'évaluation appliquée à l'agglomération lyonnaise, -Thèse de doctorat en Sciences économiques Economie des Transports LET, Université Lyon Lumière, CAUBEL D., 2006
- Théorie économique de l'accessibilité urbaine , Revue économique n°2, KOENIG G., 1974
- Diagnostic critique des indicateurs de performance économique des territoires, LEURENT F., SETRA, 2003
- Accessibilité et évaluation des politiques de transport en milieu urbain : le cas du tramway strasbourgeois, Thèse de doctorat en Sciences économiques Economie des Transports LET, Université Lyon Lumière, MERCIER A., 2008
- Valorisation foncière résultant des infrastructures de transport collectif, étude réalisée par SETEC pour le compte du MEDDM, 2010
- Instruction cadre relative aux méthodes d'évaluation économique des grands projets d'infrastructures de transport, mise à jour du 27 mai 2005
- Projet d'instruction relative aux méthodes d'évaluation économique des investissements routiers interurbains, version du 23 mai 2007
- Accessibilité des territoires et des services - Notions et représentation, Rapport d'études, SETRA, 2008
- Limites du calcul des performances économiques des territoires, cas interurbains, SETRA, 2008
- Evaluation de l'accessibilité territoriale à partir d'étude de cas, Rapport d'études, SETRA, 2012

# Chapitre 3

## Analyse coûts-avantages

## 6 - L'analyse coûts-avantages : concepts et contexte d'utilisation

L'évaluation socio-économique vise à représenter l'effet global d'un projet sur la collectivité, par l'agrégation des différents impacts de ce projet sur les différents agents. Ces différents impacts peuvent être les dépenses consenties, les temps de parcours, la qualité de service, les impacts environnementaux ou sanitaires. Les différents agents concernés sont les usagers du service de transports, les différents maîtres d'ouvrage, gestionnaires, opérateurs des services de transports, mais aussi l'Etat et les citoyens indirectement affectés par les impacts sur la sécurité, la santé et l'environnement. Cette agrégation se fait au travers d'une somme pondérée des impacts sur les différents agents, le coefficient de pondération représentant la valeur relative des impacts les uns par rapport aux autres. Cette valeur relative est exprimée en Euros, d'où le terme de monétarisation généralement employé pour qualifier cette pondération. L'agrégation, i.e. la somme des impacts ainsi monétarisés, permet alors de représenter la valeur du projet pour l'ensemble de la collectivité en un indicateur unique. Cet indicateur est dénommé bilan coût-avantages collectif ou bilan coût-avantages socio-économique, ou encore bénéfice collectif ou bénéfice socio-économique.

Cet indicateur présente l'avantage de la simplicité d'utilisation, grâce à sa représentation en une valeur unique, d'une grande variété d'impacts et d'agents concernés. Cependant, cet indicateur présente des limites d'utilisation, précisément du fait que tous les impacts ne peuvent pas être représentés par une valeur permettant la comparaison avec d'autres impacts. Ce peut être le cas d'impacts non quantifiables, ou d'impacts dont la valeur comparée aux autres impacts est inconnue.

La limite d'utilisation de l'évaluation socio-économique provient également du fait qu'elle suppose que l'ensemble des impacts à agréger sont substituables les uns aux autres : par exemple, réduire les impacts sur l'environnement peut se traduire par une réduction de la mobilité et/ou des coûts de transports plus élevés. Dans certains cas, cette hypothèse de substituabilité dit « marginale », ne peut pas être retenue. Certains impacts environnementaux ou sociaux ne peuvent pas être dépassés, et ne sont donc pas substituables à d'autres impacts ; des biens environnementaux remarquables ne peuvent pas être affectés (sites protégés) ; des biens environnementaux ne peuvent pas être affectés au delà des limites préservant leurs fonctionnalités (*cf.* trame verte et bleue).

Cependant, malgré ses limites d'utilisation, l'évaluation socio-économique peut fournir un éclairage utile lorsque l'on s'intéresse précisément à la préservation ou l'atteinte d'un objectif particulier en matière environnementale ou sociale (par exemple la préservation d'un bien environnemental ou la fourniture de services sociaux considérés comme non monétarisables – tels la mixité sociale) : en rapportant le bénéfice socio-économique de plusieurs scénarii possibles pour atteindre cet objectif, on peut mener une analyse dite coût-efficacité (par opposition à la notion de coût-avantage développée ci-dessus lorsque les impacts sont monétarisables).

### 6.1 - Surplus des usagers : concepts, mode de calcul et utilisation

Le surplus des usagers reflète la variation de son « utilité » ou satisfaction qu'il retire de l'amélioration des services de transports permise par le projet étudié. La théorie du consommateur permet d'établir un lien simple entre cette variation d'utilité d'une part, et des paramètres observables dans les comportements de l'utilisateur : le prix et la demande de transports.

C'est l'objet de la théorie du surplus (dite aussi « Surplus à la Dupuit ») présentée ci-dessous. En substance, cette théorie permet de séparer le surplus dégagé par un projet de transports en deux termes calculés à partir de la fonction de demande adressée au service de transport considéré. Cette fonction relie la demande au coût généralisé du service de transports (ce coût généralisé incorporant les prix monétaires, ainsi que la valeur du temps et d'autres paramètres de confort et de qualité monétarisables utilisés par l'utilisateur dans son choix de transport). Ces deux termes sont :

- pour la demande des usagers déjà en place avant le projet, la variation de surplus est égale à la demande multipliée par la variation de coût généralisé entre les situations avec et sans projet ;
- pour la demande nouvelle apportée par la variation de coût généralisé (y compris le trafic détourné d'autres modes) entre les situations avec et sans projet, la variation de surplus est égale à la demande nouvelle multipliée par la moitié de la variation de coût généralisé entre les situations avec et sans projet ; ceci reflète l'idée que la demande nouvelle est détournée d'une autre activité, dont elle perd alors l'utilité, et que l'utilisateur qui est prêt à se détourner de cette autre activité pour le coût généralisé en situation de projet (dit usager détourné « ultime » ou « marginal »), ne bénéficie d'aucune amélioration d'utilité puisqu'il est indifférent entre l'activité dont il s'est détournée, et le service de transports offert par le projet.

### Encadré : calcul de surplus au sens de Dupuit

Le raisonnement de Dupuit est que le prix payé par un consommateur pour un bien reflète son utilité, c'est le *consentement à payer*.

Quand la demande varie, le prix varie également, et par suite le consentement à payer pour les nouvelles unités consommées.

Pour une variation finie de la demande entre  $x_0$  et  $x_1$ , le consentement à payer est donc l'intégrale :

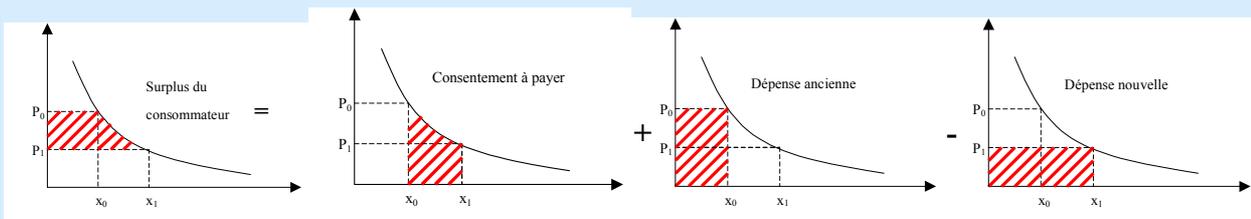
$$C_p = \int_{x_0}^{x_1} p(x) dx$$

$p(x)$  étant la fonction de prix, c'est-à-dire l'inverse de la fonction de demande.

Le surplus du consommateur est égal à la différence entre ce que les individus seraient prêts à dépenser pour acheter un montant donné d'un bien et la somme qu'ils doivent effectivement payer. Ce surplus est mesuré par la surface située sous la courbe de demande entre cette courbe et le prix payé. Cette théorie du surplus permet de mesurer l'avantage net produit pour chaque agent :

Le surplus du consommateur est donc la différence entre le consentement à payer et la variation de dépense  $p_1x_1 - p_0x_0$  :

$$S_c = \int_{x_0}^{x_1} p(x) dx - (p_1x_1 - p_0x_0)$$



Le surplus du consommateur peut être exprimé de manière équivalente à partir de la fonction de demande  $x(p)$  :

$$S_c = - \int_{p_0}^{p_1} x(p) dp$$

comme l'illustre la représentation graphique ci-dessus.

Enfin, si la transformation considérée s'accompagne d'une variation de revenu  $\Delta R$  du consommateur, le surplus devient :

$$S_c = \Delta R - \int_{p_0}^{p_1} x(p) dp$$

Cette formule exprime que la situation du consommateur est améliorée si la variation de son revenu est supérieure à l'effet résultant de la variation du prix, mesuré par l'intégrale de la fonction de demande.

Dans le calcul socio-économique, on calcule la variation de surplus entre la situation de référence et la situation de projet pour chaque agent.

Ce calcul de surplus est additif : il peut s'appliquer aux différents services de transports considérés dans le périmètre d'étude, en particulier les modes concurrents.

La méthode normalisée du calcul de surplus revient à appliquer les valeurs dites "tutélaires" de temps et de confort pour calculer les variations de coût généralisé pour les usagers.

Le surplus des usagers observé peut également être calculé directement en sortie du modèle de trafic en reconstituant le consentement à payer révélé par les usagers. Cependant, le calcul du consentement à payer sortant du modèle sera plus ou moins difficile à mettre en œuvre selon le type d'affectation utilisé. De plus, dans le cas d'un modèle multimodal, le calcul direct de surplus conduit à la prise en compte des constantes modales, qui sont oubliées dans les calculs de surplus normalisés. Le calcul de surplus "réel", en sortie de modèle, implique une vigilance accrue sur la qualité du modèle. Ainsi, a priori, les valeurs révélées ne devraient pas être trop éloignées des valeurs tutélaires.

## 6.2 - Références réglementaires et bibliographiques

- Instruction cadre relative aux méthodes d'évaluation économique des grands projets d'infrastructures de transport, mise à jour du 27 mai 2005, Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du territoire, du Tourisme et de la Mer
- Projet d'instruction relative aux méthodes d'évaluation économique des investissements routiers interurbains, version du 23 mai 2007, Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du territoire, du Tourisme et de la Mer
- Projet d'instruction relative aux méthodes d'évaluation socio-économique des projets ferroviaires, version du 20 décembre 2006, Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du territoire, du Tourisme et de la Mer
- Transports : choix des investissements et coût des nuisances, Rapport dit « Boiteux 2 », Commissariat Général du Plan, 2001
- Guide de l'analyse coûts-avantages de projets d'investissement. Guide préparé pour l'unité chargée de l'évaluation de la DG Politique Régionale, Commission Européenne, 2003
- Eléments de microéconomie, PICARD P., Montchrestien, 1998
- Principes d'économie des transports, Economica, QUINET E., 1998
- Recommandations pour l'évaluation socio-économique des projets de TCSP, CERTU, 2002

## 7 - Décomposition du bilan coûts-avantages et bilan par acteur

### 7.1 - Présentation schématique

Le bilan coûts-avantage collectif (BNA : bénéfice net actualisé) représente en théorie la somme pondérée par leur valeur monétaire, de tous les impacts du projet sur les agents présents dans l'économie. Ces impacts sont principalement de deux types : les flux monétaires réels (coûts d'investissement, d'exploitation, d'usure des véhicules, ...) et les flux monétarisables (temps de parcours, certains impacts environnementaux ou de sécurité).

Dans sa forme la plus simple et la plus représentative, le BNA s'écrit, pour un projet de transports :

$$B = - C + \Delta U + \Delta ENV$$

où

C sont les coûts de production du service de transports

$\Delta U$  est la variation de surplus des usagers du service de transports

$\Delta ENV$  représente l'ensemble des effets dits "externes" monétarisables, principalement les impacts environnementaux, mais aussi liés à la sécurité et la santé.

C constitue un flux monétaire

$\Delta U + \Delta ENV$  constituent un flux monétarisable

La formule ci-dessus permet de présenter simplement la décomposition du bilan par catégories d'acteurs. Considérons en effet, dans un premier temps, deux catégories d'acteurs :

- l'opérateur qui construit et exploite le service de transports ;
- les usagers (au sens large), qui bénéficient du service de transports  $\Delta U$ , au prix d'une dépense R (ex : péage, prix du billet) et sont affectés par les impacts environnementaux et sanitaires  $\Delta ENV$ .

Le bilan se décompose alors simplement :

Bilan pour l'opérateur :	- C + R
Bilan pour l'usager et les bénéficiaires :	+ $\Delta U + \Delta ENV - R$
Bilan collectif (= total) :	- C + $\Delta U + \Delta ENV$

Cette présentation illustre le fait que les transferts entre agents économiques (ici les recettes de la tarification des transports), s'annulent dans le bilan collectif.

Cette présentation peut s'étendre à toute autre décomposition entre acteurs.

Ainsi, si l'on considère l'Etat, qui peut par exemple subventionner en partie le service de transport (taux de subvention =  $\sigma$ ) et bénéficier de taxes sur les recettes (taux de taxe =  $\tau$ ), le bilan se décompose simplement :

Bilan pour l'opérateur :	- C . (1 - $\sigma$ ) + R . (1 - $\tau$ )
Bilan pour l'usager et les bénéficiaires :	+ $\Delta U + \Delta ENV - R$
Bilan pour l'Etat :	- C . $\sigma + R . \tau$
Bilan collectif (= total) :	- C + $\Delta U + \Delta ENV$

Remarque :

Si l'on tient compte d'un coût d'opportunité des fonds publics  $\rho$ , dans l'acception où il reflète une distorsion induite par un prélèvement sur l'économie via une fiscalité distorsive, ce bilan devient :

Bilan pour l'opérateur :	$- C \cdot (1 - \sigma) + R \cdot (1 - \tau)$
Bilan pour l'utilisateur et les bénéficiaires :	$+ \Delta U + \Delta ENV - R - \rho \cdot (C \cdot \sigma - R \cdot \tau)$
Bilan pour l'Etat :	$- C \cdot \sigma + R \cdot \tau$
Bilan collectif (= total) :	$- C + \Delta U + \Delta ENV - \rho \cdot (C \cdot \sigma - R \cdot \tau)$

De même, si l'on suppose que les bénéficiaires se décomposent en usagers du système de transports et en agents subissant les nuisances environnementales (les riverains pour fixer les idées), le bilan se décompose simplement :

Bilan pour l'opérateur :	$- C + R$
Bilan pour les usagers :	$+ \Delta U - R$
Bilan pour les riverains :	$+ \Delta ENV$
Bilan collectif (= total) :	$- C + \Delta U + \Delta ENV$

Enfin, pour terminer les présentations simplifiées des bilans par acteurs, on peut illustrer le cas de concurrence entre deux opérateurs ou modes de transports :

Bilan pour l'opérateur 1 menant le projet :	$- C + R_1$
Bilan pour l'opérateur 2 concurrencé :	$- R_2$
Bilan pour les usagers :	$+ \Delta U - R_1 + R_2 + \Delta ENV$
Bilan collectif (= total) :	$- C + \Delta U + \Delta ENV$

## 7.2 - Décomposition par type d'impacts et par acteurs : présentation de référence

Dans la présentation du bilan collectif, on retient couramment la décomposition suivante : le bilan collectif du scénario d'aménagement est présenté comme la somme des avantages des usagers, des tiers (incluant les riverains) (avantages pour l'environnement), de la Puissance Publique (à laquelle on attribue les avantages de sécurité non pris en compte par les usagers), des opérateurs ou exploitants des réseaux, des collectivités et éventuellement des usagers des autres modes de transport, diminués des dépenses d'investissement, d'entretien et d'exploitation du scénario d'aménagement et, éventuellement, des pertes de recettes des opérateurs des autres modes de transport réduites de leurs économies de frais d'exploitation et d'entretien.

Le bénéfice net actualisé s'écrit alors :

$$\mathbf{BNA} = \Delta \mathbf{U} + \Delta \mathbf{S} + \Delta \mathbf{Env} - \Delta \mathbf{E} - \mathbf{I} + \Delta \mathbf{R} + \Delta \mathbf{P} + \Delta \mathbf{X}$$

Avec :

$\Delta U$  : Avantages des usagers

$\Delta S$  : Avantages en termes de sécurité

$\Delta Env$  : Avantages pour l'environnement

$\Delta E$  : Variation des dépenses d'entretien et d'exploitation pour le gestionnaire du projet étudié

$I$  = Coûts d'investissement du projet étudié

$\Delta R$  : Recettes du gestionnaire du projet étudié

$\Delta P$  : Avantages nets des opérateurs de transports autres que le gestionnaire du projet étudié

$\Delta X$  : Variations de recettes fiscales

On voit ainsi se décomposer le bilan en trois principaux termes :

- le surplus des usagers et les impacts environnementaux ;
- le bilan pour l'opérateur ou gestionnaire du projet ;
- le bilan pour les autres acteurs : opérateurs concurrents et Etat

$$\text{BNA} = [\Delta U + \Delta S + \Delta \text{Env}] + [- \Delta E - I + \Delta R] + [\Delta P + \Delta X]$$

### 7.3 - Calculs des différents impacts et bilans par acteurs : principes et précautions

$\Delta U$  : Avantages des usagers : les usagers comprennent, pour tous les modes compris dans les options de projet et de référence évaluées : anciens usagers, usagers reportés, usagers des autres modes, usagers induits, personnes à mobilité réduite ; cet impact tient compte des effets liés au confort et à la congestion liés à la modification de la demande de transport par mode. Se référer aux parties Coût généralisé et valeur du temps et Modélisation ainsi qu'au paragraphe Surplus des usagers : concepts, mode de calcul et utilisation.

$\Delta S$  : Avantages en termes de sécurité : les coûts d'insécurité sont évalués à partir de valeurs tutélaires. Le gain de sécurité routière est valorisé dans le calcul économique en évaluant le nombre de vies humaines épargnées par la réalisation du projet. Pour cela, la vie humaine ou le blessé sont monétarisés et on utilise des taux d'insécurité par mode et par type d'infrastructure.

$\Delta \text{Env}$  : avantages pour l'environnement : pollution de l'air, bruit, effet de serre.

$\Delta E$  : variation des dépenses d'entretien et d'exploitation (hors taxes) actualisées du scénario d'aménagement.

$I$  = coûts d'investissement du projet.

$\Delta P$  : avantages nets des opérateurs de transports : concessionnaire de l'infrastructure, des exploitants et du transporteur selon le mode : ces avantages nets comportent d'une part une augmentation de recettes, d'autre part une variation des coûts.

- *Pour les maîtres d'ouvrages et gestionnaires routiers :*
  - variations de recettes de péage.
    - les péages pris en compte dans la modélisation s'appuient sur les péages observés. Sur le projet, on peut se référer au niveau pratiqué sur les sections adjacentes.
    - pour les tests de sensibilité de scénarios d'aménagement, divers taux de péage seront retenus en étroite liaison avec le maître d'ouvrage
    - NB : le couple péages/trafics de l'évaluation socio-économique doit être cohérent avec celui utilisé dans l'analyse financière
  - variations de coûts d'entretien et d'exploitation, pour les autres opérateurs ou gestionnaires routiers que celui du projet étudié ;
    - NB : les variations de coût des infrastructures sont normalement prises en compte, pour l'opérateur gestionnaire du projet étudié, dans les termes  $-\Delta E - I$  ; il convient d'éviter les double-comptes
- *Pour le mode ferroviaire*, l'expression de la variation de recettes nette peut être calculée selon la formule suivante :

$$\Delta P = N_f \times (C_{\text{im arg}} - R)$$

où

$N_f$  : nombre d'usagers supplémentaires.

$C_{\text{marg } t}$  : coût marginal d'entretien et d'exploitation par usager de l'opérateur. A défaut de connaître les coûts sur la ligne étudiée, on peut retenir des coûts marginaux moyens représentatifs de la catégorie de ligne à laquelle elle appartient. Ces coûts sont des hypothèses simplificatrices mais l'information n'est pas toujours disponible auprès du transporteur historique. Ces coûts sont la somme de 3 composantes :

- composante horaire (coût de possession du matériel, coût de personnel direct)
- composante kilométrique (coût d'entretien du matériel, d'énergie, péages)
- composante commercialisation, par voyageur (pour les trains de voyageurs)

$R_t$  : recette moyenne par voyageur de l'opérateur (incluant les éventuelles compensations), correspondant à chaque ligne étudiée. Les hypothèses de recette moyenne s'appliquent, elles aussi, en théorie, ligne par ligne, notamment pour l'interurbain, compte tenu de la concurrence intermodale (route, air notamment), qui vient limiter le pouvoir de monopole de fait dans le secteur ferroviaire. Pour les recettes moyennes des services régionaux, on peut se référer aux conventions avec les autorités organisatrices régionales.

- *Pour le mode aérien*, les impacts sont mesurés en termes de passagers, de mouvements, et d'emport moyen à partir de modélisations ou à dire d'experts. Des hypothèses en matière de taille des avions permettent d'estimer le tonnage atterri. A partir de ces éléments, on peut évaluer l'impact du projet en termes de recettes nettes des coûts. L'impact sur le mode aérien comprend également les possibilités d'adaptation de la flotte et des effectifs. Par ailleurs, le périmètre des opérateurs du mode aérien inclut les gestionnaires d'aéroport, et les recettes et dépenses induites par les modifications de mouvements aériens et de passagers accueillis (y compris, si besoin, les dépenses d'extension des capacités : extension d'aérogares, de parking avions ou de parcs autos, etc...).
- *Pour les autres modes* et de façon générale, les effets pour les opérateurs et gestionnaires des *pôles d'échanges intermodaux*, comprennent les recettes et coûts supplémentaires générés par les modifications de la demande de transports.

$\Delta X$  : Recettes fiscales sur les usagers : la prise en compte des taxes (ou recettes fiscales pour l'Etat) renvoie aux questions de l'usage de la fiscalité : on peut distinguer deux cas :

- soit cette fiscalité relève plutôt d'une logique de redevance d'usage dans le secteur des transports ou de l'environnement, et qui reflète un coût ou une dépense pris en compte par ailleurs dans le bilan du projet (par exemple TCIP, taxe à l'essieu, qui participent à la couverture des coûts d'infrastructure et d'environnement) : dans ce cas, on doit s'assurer qu'au total, n'est pris en compte dans le bilan coût-avantage collectif, que le coût réellement induit par la demande de transports supplémentaire générée par le projet, ce coût étant supposé justifier cette taxe assimilable alors à une redevance ; par exemple, dans l'exemple simplifié ci-dessus, si la taxe T ajoutée au prix du transport R est destinée à couvrir les coûts d'usage de l'infrastructure CP induits sur l'infrastructure (publique), les termes du bilan s'écrivent :

Bilan pour l'opérateur privé :	- C + R
Bilan pour les usagers :	+ $\Delta U$ - R - T
Bilan pour l'Etat :	+ T - CP
Bilan collectif (= total) :	- C - CP + $\Delta U$

Au total, cette taxe assimilable à une redevance disparaît dans le bilan total, elle est remplacée par la dépense qu'elle est supposée refléter (CP).

- soit cette fiscalité ne recouvre pas directement une dépense qui apparaît en tant que telle dans le bilan coût-avantage collectif du projet considéré : par exemple, la fiscalité générale (TVA, droits d'enregistrements) : dans ce cas, on doit considérer aussi que cette fiscalité reflète des services rendus par la collectivité pour accompagner la fourniture des services de transports : mais, du fait que ces dépenses collectives ne sont pas prises en compte dans un autre terme du bilan global (coûts

d'infrastructures publiques ou d'environnement), il faut tenir compte de ces taxes, de la façon suivante : dans l'exemple simplifié ci-dessus, si la taxe T ajoutée au prix du transport R est destinée à couvrir des coûts collectifs non pris en compte par ailleurs dans le bilan, on suppose que ces coûts sont exactement couverts par le montant de la taxe, et ainsi, les termes du bilan s'écrivent :

Bilan pour l'opérateur privé :	- C + R
Bilan pour les usagers :	+ ΔU - R - T
Bilan pour l'Etat (supposé couvrir les coûts par la taxe) :	+ T - T
Bilan collectif (= total) :	- C - T + ΔU

Ainsi, dans le bilan global, ces taxes viennent grever le bilan coût-avantage collectif, car elles traduisent des ressources collectives « cachées » dépensées pour produire ce service.

Cette logique, qui doit guider en permanence l'évaluateur, doit lui permettre d'éviter les double-comptes dans les bilans, dont le risque est important dès que l'on s'intéresse à des transferts entre agents économiques. Dans cette logique, l'économie de taxes liée à la demande détournée d'autres modes (de taux de TVA éventuellement différents) doit également être prise en compte. Dans cette logique également, il convient de tenir compte de la demande de transports induite par le projet : cette demande est supposée détournée d'un autre secteur de consommation que celui des transports. Pour cette demande induite, on fera l'hypothèse que la dépense transport des usagers se substitue à une autre dépense qui aurait été effectuée au taux moyen national de TVA.

## 7.4 - Points de vigilance

Plusieurs éléments importants sont à garder à l'esprit dans la prise en compte des effets croisés entre opérateurs et modes de transports :

- comme mentionné précédemment, il convient de s'assurer qu'il n'y a aucun double compte dans les coûts et recettes de trafic entre opérateurs : chaque dépense et chaque recette doit être affectée au gestionnaire concerné ;
- les effets croisés peuvent jouer aussi bien en concurrence qu'en complémentarité entre modes ;
- les transferts de demande d'un opérateur ou d'un mode à l'autre peuvent jouer sur la recette moyenne de chacun des modes : ainsi, si les usagers dont le consentement à payer est le plus élevé se transfèrent vers les services de transports les plus rapides et les plus chers, ceci peut se traduire par l'utilisation préférentielle des classes supérieures dans ces modes ; il conviendra donc de s'assurer de la cohérence entre les modèles d'affectation fondés sur des distributions de la valeur du temps, et les modèles de recettes moyennes.

Enfin, de façon générale, la présentation ci-dessus n'est pas exclusive de l'inclusion de tout autre opérateur ou mode de transports dans l'évaluation, dès lors de respecter les mêmes principes :

- prise en compte des recettes nettes des coûts supplémentaires induits par les modifications de demande de transports ;
- éviter les double-comptes : s'assurer qu'une recette et une dépense donnée est attribuée à un opérateur ou gestionnaire unique ;
- si les modifications de demande impliquent des ajustements de capacité, les coûts correspondants doivent être pris en compte ;
- si l'ajustement de capacité se fait à la baisse, il convient d'analyser quelle partie des coûts peut être ajustée à la baisse dans l'horizon du projet ;
- s'agissant de la fiscalité, l'évaluation doit assurer la cohérence entre les bilans des différents acteurs, selon la logique rappelée ci-dessus :

- soit des dépenses supposées servir de justification à cette fiscalité sont déjà prises en compte dans un des termes du bilan (par exemple, coûts d'infrastructure ou d'environnement, et les taxes doivent venir grever le bilan des usagers, mais les coûts supposés reflétés par cette taxe doivent venir grever la Puissance publique ;
- soit les dépenses supposées servir de justification à cette fiscalité ne sont pas prises en compte dans un des termes du bilan, et il convient de grever le bilan de la puissance publique de ces coûts ; du fait que ces coûts sont inconnus, on fait l'hypothèse qu'ils sont marginalement égaux aux recettes fiscales dégagées

## 7.5 - Présentation indicative des résultats

Le bilan peut être désagrégé par type d'utilisateur et par nature, par exemple selon la ventilation suivante :

	Usagers	Puissance publique	Opérateur du projet	Autres opérateurs	Riverains et environnement
<b>Temps</b>					
<b>Confort et autres attributs de qualité</b>					
<b>Usage et dépréciation des véhicules</b>					
<b>Carburant</b>					
<b>Recette tarifaire ou péage</b>	-		+		
<b>Sécurité</b>					
<b>Pollution</b>					
<b>Bruit</b>					
<b>Effet de serre</b>					
<b>Coût d'investissement</b>					
<b>Entretien et exploitation</b>					
<b>Recettes fiscales</b>	-	+	-	-	
<b>Recettes autres opérateurs</b>					
<b>Coûts autres opérateurs</b>					

La présentation du bilan par catégorie d'acteurs peut également être adaptée aux besoins (notamment de concertation) spécifiques au projet.

## 7.6 - Références réglementaires et bibliographiques

- Instruction cadre relative aux méthodes d'évaluation économique des grands projets d'infrastructures de transport, mise à jour du 27 mai 2005, Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du territoire, du Tourisme et de la Mer
- Projet d'instruction relative aux méthodes d'évaluation économique des investissements routiers interurbains, version du 23 mai 2007, Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du territoire, du Tourisme et de la Mer
- Projet d'instruction relative aux méthodes d'évaluation socio-économique des projets ferroviaires, version du 20 décembre 2006, Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du territoire, du Tourisme et de la Mer
- Transports : choix des investissements et coût des nuisances, Rapport dit « Boiteux 2 », Commissariat Général du Plan, 2001
- Guide de l'analyse coûts-avantages de projets d'investissement. Guide préparé pour l'unité chargée de l'évaluation de la DG Politique Régionale, Commission Européenne, 2003
- Eléments de microéconomie, PICARD P., Montchrestien, 1998
- Principes d'économie des transports, Economica, QUINET E., 1998
- Recommandations pour l'évaluation socio-économique des projets de TCSP, CERTU, 2002

## 8 - Taux d'actualisation : utilisation

L'actualisation est la méthode utilisée dans l'évaluation socio-économique ou financière pour ramener à une date unique des grandeurs monétaires ou monétarisées qui s'échelonnent dans le temps.

En pratique, on utilise pour cela un taux d'actualisation.

Le taux d'actualisation permet de comparer entre elles des valeurs économiques qui s'échelonnent dans le temps, en ramenant une valeur future à une valeur actuelle. Ces valeurs sont comparées à des dates identiques, appelée année d'actualisation. Le taux d'actualisation s'applique à des valeurs constantes, c'est-à-dire ne subissant pas d'inflation (voire encadré ci-dessous pour les définitions de l'inflation et des prix courants et constants). La valeur du taux d'actualisation représente la plus ou moins grande préférence que l'on a pour le présent par rapport au futur.

Cette partie présente l'utilisation du taux d'actualisation dans le cadre d'une non prise en compte du risque dans le calcul socio-économique. Le cadre conceptuel et le calcul du taux d'actualisation avec et sans risque est décrit dans la partie Prise en compte du risque dans le calcul économique

### 8.1 - Définition et utilisation

On définit le facteur d'actualisation  $\gamma_t$  comme le facteur par lequel il faut multiplier une unité (de consommation, d'impact, de revenu) de l'année  $t$  pour la rendre équivalente, en termes d'utilité (ou de préférence, ou de satisfaction), à la même quantité disponible aujourd'hui ( $t=0$ ). Ainsi, la quantité de consommation qui est équivalente, en termes d'utilité (ou de satisfaction) à une valeur de 1 € disponible aujourd'hui, est égale à  $\gamma_t * 1$  € si elle n'est disponible que dans  $t$  années.

En règle très générale,  $\gamma_t > 1$  : les agents économiques ont une préférence pour la disponibilité immédiate par rapport à la disponibilité différée. En ce sens, on définit souvent le facteur d'actualisation comme la préférence pour le présent.

Le taux d'actualisation  $a_t$  permet de ramener une grandeur  $A_t$  de l'année  $t$  à une grandeur  $A_0$  de l'année 0 selon la formule :

$$A_0 = \frac{A_t}{(1 + a_t)^t}$$

Le taux d'actualisation  $a_t$  permet d'exprimer le facteur d'actualisation de façon exponentielle en fonction du temps entre aujourd'hui et la date de disponibilité du bien considéré :  $\gamma_t = (1 + a_t)^t$ . On fait en général l'hypothèse que le taux d'actualisation peut, au moins sur des périodes limitées (10 à 30 ans), être considéré comme constant, soit :  $\gamma_t = (1 + a)^t$

Ainsi, une séquence de quantités de bien disponibles aux dates  $t=0, \dots, T$  en quantités  $A_0, \dots, A_t, \dots, A_T$  peut se représenter, en termes d'utilité, en une quantité équivalente, disponible à la date  $t=0$  :

$$\sum_{t=0}^T \frac{A_t}{(1 + a)^t}$$

Dans le calcul socio-économique, on est amené à calculer des bilans coûts-avantages du point de vue de divers agents de l'économie et de la société. En théorie, selon le point de vue duquel on se place, on devrait retenir le taux d'actualisation de l'agent concerné. En pratique, il convient de distinguer le calcul du bilan socio-

économique collectif, auquel cas, il faut retenir le taux d'actualisation public, qui reflète la préférence pour le présent de la collectivité. Lorsque l'on s'intéresse au choix d'acteurs privés qui conditionnent le choix du projet public, il est légitime de prendre en compte leur propre taux d'actualisation.

## 8.2 - Taux d'actualisation et inflation

Le calcul socioéconomique est réalisé en monnaie constante i.e. les différents flux (investissements, recettes, surplus des usagers, effets externes, ...) sont calculés avec des prix corrigés de l'inflation. Pour que les flux soient comparables, ils doivent :

- être exprimés en euros de la même année (pour que les coûts soient exprimés dans la même unité) ;
- être actualisés à la même année (pour que la date à laquelle les flux sont reçus soit prise en compte dans la comparaison).

Ainsi, concrètement, dans le calcul socio-économique, on met tous les coûts en euros de la même année à l'aide des indices de prix de l'INSEE (on utilise pour ce faire l'indice des prix à la consommation (IPC) ou les indices spécifiques à chaque type de coût). Une fois les prix exprimés en euros de la même année, les avantages annuels sont calculés puis, pour rendre comparables les avantages reçus à une date  $t$  aux avantages reçus à une date  $t+T$ , on actualise ces avantages à la même année, appelée année d'actualisation.

La notion d'actualisation est distincte des notions d'inflation, d'indexation qui consiste à transformer des euros d'une année donnée en euros d'une autre année en utilisant de manière ascendante ou descendante un index (exemple index TP01) et distincte également du taux d'intérêt bancaire.

Le taux d'actualisation ne doit donc pas être confondu avec :

- le taux d'inflation : l'évaluation socio-économique se fait en euros constants et le taux d'actualisation s'applique donc à des grandeurs déjà exprimées dans une même unité monétaire (par exemple des euros 2012) ;
- les calculs de déflateurs : les déflateurs consistent à rapporter des prix à un prix de référence : les prix évoluent au cours du temps dans l'économie, mais, pour les comportements des agents, ce qui compte en théorie est le niveau des prix et des revenus relativement les uns aux autres. Les déflateurs reprennent cette idée, en retenant un dénominateur commun, pour chaque période, pour tous les prix : en l'occurrence, il s'agit de l'indice des prix à la consommation ou l'indice des prix du produit intérieur brut. Ainsi, dans les calculs d'actualisation, les différents flux (investissements, recettes, surplus des usagers, effets externes) sont exprimés en monnaie constante (c'est-à-dire corrigée de l'inflation)

### Prix courants et prix constants

Les prix courants sont les prix tels qu'ils sont indiqués à une période donnée, ils sont dits en valeur nominale. Les prix constants sont les prix en valeur réelle c'est-à-dire corrigés de la hausse des prix par rapport à une donnée de base ou de référence.

Ainsi, les valeurs monétaires qui figurent dans un bilan socio-économique ne tiennent pas compte de l'inflation au cours du temps (effet prix) : elles sont données en euros constants (qui reflètent uniquement l'effet volume). Pour ramener des valeurs courantes en valeurs constantes, un index d'inflation (**déflateur**) est utilisé :

- l'indice des prix à la consommation pour les biens marchands consommés par les ménages (cet indice est disponible sur le site de l'INSEE) ;
- l'évolution du PIB pour la valeur du temps de transport de marchandises ;
- ...

Le déflateur permet ainsi de traduire en euros actuels des valeurs exprimées en prix constants (euros du passé). Il permet aussi de traduire en euros du passé des valeurs exprimées en euros actuels.

## **Inflation**

L'inflation est la perte du pouvoir d'achat de la monnaie qui se traduit par une augmentation générale et durable des prix.

Elle doit être distinguée de l'augmentation du coût de la vie. La perte de valeur des unités de monnaie est un phénomène qui frappe l'économie nationale dans son ensemble, sans discrimination entre les catégories d'agents.

Pour évaluer le taux d'inflation, en France, on utilise comme déflateur l'indice des prix à la consommation (IPC), même si cette mesure n'est pas complète (le phénomène inflationniste couvrant un champ plus large que celui de la consommation des ménages).

L'IPC n'est ni un indice du coût de la vie, ni un indice de dépense. C'est une mesure synthétique de l'évolution de prix des produits, à qualité constante, mais il ne suit pas la variation des quantités achetées d'un mois à l'autre.

## **8.3 - Points de vigilance**

La détermination du taux d'actualisation des investissements publics constitue un exercice complexe qui repose sur l'estimation de paramètres tels que l'évolution de la croissance potentielle de l'économie. Les paramètres pris en compte dans la détermination du taux d'actualisation sont détaillés dans la partie sur le risque.

La prise en compte du risque et des incertitudes conduit à séparer :

- la préférence pure pour le présent, qui doit, comme ci-dessus, ne pas tenir compte des risques spécifiques au projet ;
- les notions de risques du projet, qui sont à intégrer dans le calcul socio-économique : ce calcul vise à résumer dans une valeur équivalente, en termes d'utilité (ou de satisfaction), la réalisation probabilisée de différents aléas (appelés en analyse de risque « états du monde »). Voir la partie Prise en compte du risque dans le calcul économique qui détaille ce dernier point.

L'utilisation d'un taux d'actualisation positif tend à minorer des effets de long terme (effet de serre par exemple) dont certains peuvent être irréversibles. La prise en compte de ces effets peut néanmoins être traitée avec un taux d'actualisation tutélaire unique. On attribue pour cela des valeurs délibérément croissantes dans le temps à certains effets de long terme.

Enfin, la préférence pour le présent est celle des agents de l'économie et de la société actuelle. Il est possible que les préférences de ces agents évoluent au cours du temps, notamment parce que leur richesse augmente. De plus, la préférence pour le présent des générations futures, qui peuvent être impactées par le projet, n'est pas connue.

## 8.4 - Références réglementaires et bibliographiques

- Arbitrages intertemporels, risque et actualisation, Série méthodes n°04-M02, DEEE, MEDD, GALLON S. et MASSE E., 2004.
- Révision du taux d'actualisation des investissements publics, Rapport du groupe d'experts présidé par Daniel Lebègue, Commissariat Général du Plan, 2005.
- Actualisation : prise en compte du temps dans un environnement risqué in calcul économique dans le processus de choix collectif des investissements de transport, Predit, Economica GOLLIER C., 2007.
- Eléments de microéconomie, PICARD P., Montchrestien, 1998
- Principes d'économie des transports, Economica, QUINET E., 1998

## 9 - Bilan coût avantages collectif actualisé et indicateurs complémentaires

### 9.1 - Le bilan coûts-avantages collectif actualisé

La partie L'analyse coûts-avantages : concepts et contexte d'utilisation présente le cadre général de l'analyse coûts avantages et la partie Décomposition du bilan coûts-avantages et bilan par acteur précise les coûts et avantages à prendre en compte lors du calcul de bilans (globaux ou par catégories d'acteurs).

Les concepts et définitions présentés dans les deux parties précédemment citées s'appliquent par extension à un projet présentant des coûts et des impacts étalés dans le temps : dans ce cas, les bilans (globaux ou par catégories d'acteurs) peuvent être agrégés en un bilan actualisé, en application des règles d'actualisation.

A noter que l'on utilise dans le bilan coûts-avantage collectif actualisé, et sa décomposition par acteurs, le taux d'actualisation dit « public » (voir les parties Taux d'actualisation : utilisation et Prise en compte du risque dans le calcul économique). Il convient de clarifier ici un point : la décomposition par acteurs vise à fournir une indication au décideur et au débat public sur l'impact éventuellement différencié par acteurs, du projet. Il ne s'agit pas de simuler la décision de ces acteurs, qui relève d'une autre approche.

En effet, si l'on veut conduire des études spécifiques pour appréhender la façon dont certains acteurs vont décider de leur participation au projet (notamment des concessionnaires), il convient alors d'utiliser leur propre taux d'actualisation, qui peut être différent du taux public, notamment pour les opérateurs et gestionnaires privés soumis à des contraintes de rentabilité par leurs actionnaires, et fonction de leur niveau de risque).

Pour illustrer la prise en compte de l'actualisation, on présente le bilan coûts-avantages en distinguant :

- les investissements d'une part (supposés consentis en début de vie du projet :  $t_0$ ) :  $I_{t_0}$
- les avantages nets récurrents au cours de la vie du projet : pour chaque année  $t$  après le début du projet :  $A_{t_0+t}$
- la valeur résiduelle du projet (à la fin de la durée de vie du projet :  $N$ ) :  $VR$

Le bénéfice actualisé collectif s'écrit alors à l'année 2011 :

$$B_{2011} = - \frac{I_{t_0}}{(1+a)^{t_0-2011}} + \sum_{t=1}^N \frac{A_{t_0+t}}{(1+a)^{t_0-2011}} + VR$$

Avec  $B_{2011}$  : bénéfice actualisé à l'année 2011  
 $I_{t_0}$  : coût d'investissement à l'année  $t$ , en euros 2010, exprimé HT  
 $A_{t_0+t}$  : avantage net de l'année  $t_0+t$   
 $a$  : taux d'actualisation  
 $N$  : durée de vie de l'opération (par convention 50 ans)  
 $VR$  : valeur résiduelle actualisée de l'investissement  
 $t_0$  : année précédant la mise en service

### 9.2 - Utilisation du bénéfice actualisé collectif et indicateurs complémentaires

#### 9.2.1 - Principes d'utilisation

Le bénéfice actualisé mesure la variation d'utilité collective liée au scénario d'aménagement et permet d'apprécier son intérêt intrinsèque. Ce critère de choix conduit à retenir parmi les scénarios d'aménagements

dont le bénéfice actualisé est positif, celui dont ce bénéfice actualisé est maximal. Les comparaisons doivent être effectuées avec des bénéfices actualisés calculés à une même année d'actualisation.

Le bilan coûts – avantages actualisé est un bilan différentiel dans lequel on compare la situation de projet à une situation de référence si le projet n'est pas réalisé, tenant compte de toute la durée de vie du projet. Ce bilan permet la comparaison de tous types de variantes alternatives d'un même projet ; on entend par variantes des scénarii concourant au même objectif que le projet : on parle alors de projets concurrents. Ces variantes peuvent se distinguer entre elles par le niveau de service considéré, les technologies et les coûts, les impacts environnementaux et les mesures consenties pour les réduire, l'étalement ou le différé des dépenses et/ou des impacts.

Dans ce cas, le choix public, lorsqu'il est fondé sur le bénéfice actualisé collectif, doit maximiser ce bénéfice parmi les variantes.

Dans des conditions particulières, on peut utiliser des indicateurs issus du bénéfice actualisé collectif. C'est le cas notamment pour calculer une date optimale de mise en service : on utilise alors la notion de taux de rentabilité immédiate (développée ci-dessous).

On peut aussi, pour tenter de refléter la robustesse d'un choix fondé sur le calcul du bénéfice collectif actualisé, utiliser le taux de rentabilité interne : cet indicateur permet d'avoir une idée, indépendamment de la taille du projet, de l'écart entre son bénéfice collectif actualisé et la valeur zéro de ce bilan : ce faisant, on dispose d'une appréciation qualitative sur le risque de choisir un mauvais projet (i.e. de bilan négatif).

Lorsque l'on a à faire à des projets qui ne sont pas concurrents dans leurs objectifs (par exemple des projets dans des zones géographiques considérées comme suffisamment éloignées les unes des autres, ou des services de transports répondant à des logiques totalement exclusives l'une de l'autre : exemple : un terminal portuaire marchandises et un aménagement pour personnes à mobilité réduite), dans ce cas, le choix public ne peut pas être fondé sur la comparaison des bénéfices actualisés. On peut, après s'être assuré que les bénéfices actualisés respectifs des projets sont positifs, recourir à des indicateurs du type « bénéfice actualisé par euro investi » ou par « euro public investi », qui traduisent l'idée que les projets sont concurrents non pas en termes d'objectifs, mais de ressources mobilisées. Ce point est développé ci-dessous.

Pour prendre en compte les incertitudes dans le calcul socio-économique, on peut calculer un bénéfice actualisé espéré puis éventuellement lui soustraire une prime de risque (cf partie Prise en compte du risque dans le calcul économique).

### 9.2.2 - Indicateurs de rentabilité complémentaires

Pour caractériser la rentabilité socio-économique du projet, il existe les indicateurs complémentaires suivants pour compléter le bilan coûts-avantages :

- Taux de rentabilité interne
- Taux de rentabilité immédiate et date optimale de mise en service

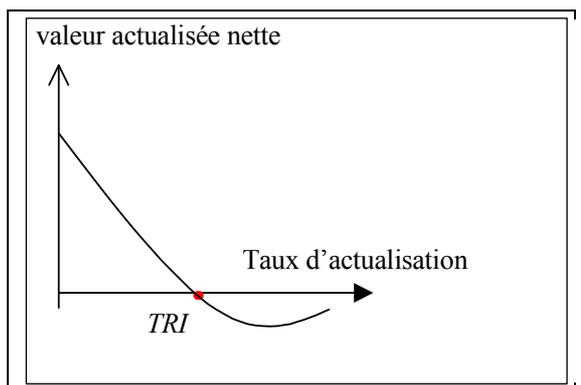
De plus, quand c'est nécessaire, l'analyse de la rentabilité socio-économique du projet peut être complétée par les deux indicateurs suivants :

- Bénéfice actualisé par euro dépensé (B/I)
- Bénéfice actualisé par euro public dépensé

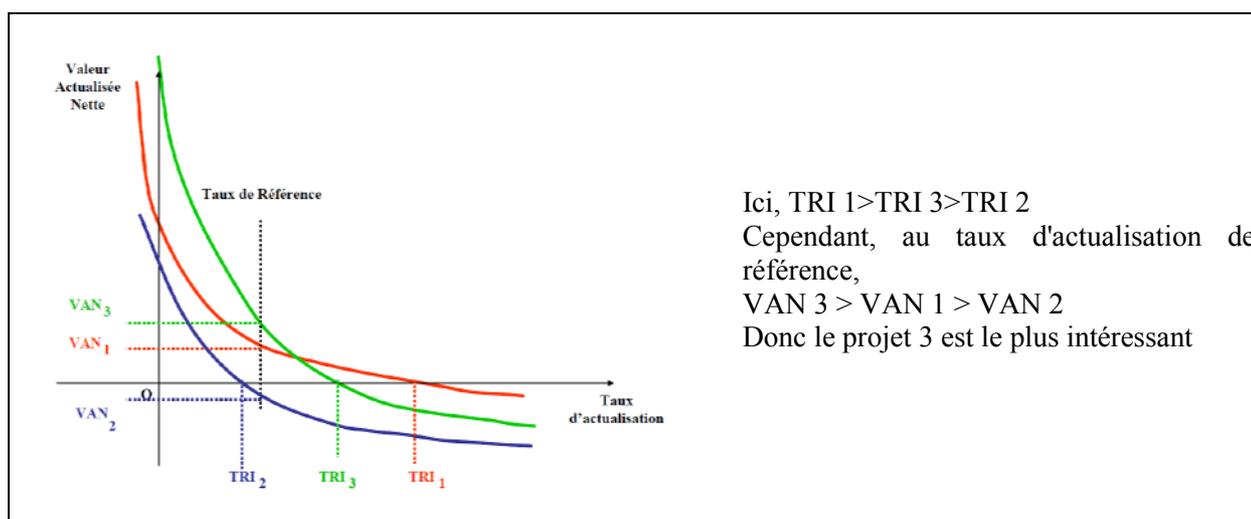
#### **Taux de rentabilité interne (TRI)**

C'est la valeur du taux d'actualisation qui annule le bénéfice net actualisé.

Si le TRI est supérieur au taux d'actualisation tutélaire alors le projet est bénéfique pour la collectivité.



Le TRI ne permet pas de comparer et hiérarchiser des projets concurrents entre eux.



### 9.2.3 - Taux de rentabilité immédiate et date optimale de mise en service

La date optimale de mise en service est la date pour laquelle le bénéfice actualisé est maximal. Pour déterminer cette date, on compare les bénéfices actualisés calculés avec différentes années de mise en service. Pour les comparaisons, tous les calculs doivent être effectués à une même année d'actualisation.

Pour comparer des scénarios d'aménagement incompatibles (s'excluant entre eux), on retient une fois ceux-ci placés à leur date optimale de mise en service et actualisés à la même année, celui qui a le plus grand bénéfice actualisé en l'absence de contrainte de financement, et celui qui a le plus grand bénéfice actualisé par euro public dépensé en présence d'une telle contrainte.

Le taux de rentabilité immédiate est le rapport des avantages lors de la première année de mise en service sur le

coût d'investissement:

$$R_{immédiat} = \frac{A_1}{I}$$

Les avantages nets liés à une nouvelle infrastructure sont généralement croissants dans le temps. En effet, ces avantages sont proportionnels au trafic écoulé qui, dans une période de croissance économique augmente régulièrement.

Ainsi, un projet de coût d'investissement  $I$  ayant à l'année  $i$  un avantage net  $A_i$ , aura pour bénéfice actualisé  $s$  il est réalisé à l'année  $0$  :

$$B_{\text{réalisé à l'année 0}} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{(1+a)^i} - I$$

Si ce même projet est réalisé à l'année 1, il aura pour bénéfice actualisé, toujours exprimé en euros de l'année 0 :

$$B_{\text{réalisé à l'année 1}} = \sum_{i=2}^n \frac{A_i}{(1+a)^i} - \frac{I}{1+a}$$

on a donc intérêt à reporter le projet d'un an si  $B_{\text{réalisé à l'année 1}} > B_{\text{réalisé à l'année 0}}$

soit si  $a > \frac{A_1}{I}$  c'est-à-dire si le taux de rentabilité immédiate est inférieur au taux d'actualisation.

Il en sera de même à l'année suivante et on a donc intérêt à réaliser le projet dès que le taux de rentabilité immédiate est égal au taux d'actualisation.

La date optimale de mise en service est donc celle où le taux de rentabilité immédiate devient égal au taux d'actualisation.

A noter que cet indicateur n'est utilisable que si les avantages nets croissent à un rythme positif avec le temps.

### **Bénéfice net actualisé par euro dépensé et investi**

Le bénéfice par euro investi est le rapport entre le bénéfice actualisé et le coût d'investissement hors taxes (coût d'entretien et d'exploitation exclus).

Le bénéfice actualisé par euro dépensé est le rapport entre le bénéfice actualisé et le coût global hors taxes (coût d'investissement et coût d'entretien et d'exploitation) actualisé hors taxes  $G_{2011ht}$  :

$$\frac{B_{2011}}{G_{2011ht}} = \frac{\text{Bénéfice actualisé en 2011}}{\text{Coût global HT actualisé en 2011}}$$

Cet indicateur permet de classer différentes opérations indépendantes constitutives d'un programme en retenant celles qui procurent le B/G le plus élevé jusqu'à épuisement de l'enveloppe.

Ces indicateurs permettent de classer des scénarios d'aménagements indépendants, placés à leur date optimale de mise en service, pour tenir compte de la contrainte de financement.

### **Bénéfice net actualisé par euro public dépensé**

Le bénéfice actualisé par euro public dépensé est le rapport entre le bénéfice actualisé et l'ensemble des dépenses et des recettes publiques engendrées au cours de la vie du projet. Cet indicateur permet de classer des scénarios d'aménagement indépendants, placés à leur date optimale de mis en service, pour tenir compte de la contrainte budgétaire.

Il est destiné à prendre en compte le coût d'opportunité des fonds publics. Cette méthode constitue une alternative à la prise en compte des pertes d'efficacité économiques liées aux prélèvements fiscaux via le coût d'opportunité des fonds publics (COFP) (cf. partie Coût d'opportunité des fonds publics). Ainsi, ne devraient être entreprises que les opérations dont le rapport bénéfice actualisé par euro public dépensé est supérieur au COFP (les dépenses incluent les coûts d'investissement ainsi que les dépenses d'entretien et d'exploitation à la charge du public). Cette formulation est équivalente à celle où toute dépense et recette publique est affectée d'un coefficient égal au COFP.

A noter que pour cet indicateur, il est nécessaire de connaître les subventions pour les projets subventionnés et/ou concédés.

### 9.3 - Synthèse sur les points de vigilance

Lorsque l'on manipule les valeurs monétaires du calcul économique : valeurs tutélaires ou marchandes il faut être vigilant :

- à la prise en compte des taxes ;
- à la prise en compte des transferts entre acteurs, afin d'éviter les doubles-comptes ;
- à l'année d'actualisation ;
- à l'année de valeur monétaire ;
- à l'année de calcul de la valeur (par exemple pour la valeur du temps qui croît chaque année).

Les indicateurs de rentabilité n'ont pas tous le même domaine de pertinence. De façon générale, celui qui comporte l'information la plus riche est le bénéfice actualisé collectif.

Dans le bilan socio-économique, on calcule la variation de surplus entre l'option de référence et l'option de projet pour chaque agent.

Pour les comparaisons, tous les calculs doivent être effectués à une même année d'actualisation.

## 9.4 - Références réglementaires et bibliographiques

- Instruction cadre relative aux méthodes d'évaluation économique des grands projets d'infrastructures de transport, mise à jour du 27 mai 2005, Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du territoire, du Tourisme et de la Mer
- Projet d'instruction relative aux méthodes d'évaluation économique des investissements routiers interurbains, version du 23 mai 2007, Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du territoire, du Tourisme et de la Mer
- Projet d'instruction relative aux méthodes d'évaluation socio-économique des projets ferroviaires, version du 20 décembre 2006, Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du territoire, du Tourisme et de la Mer
- Transports : choix des investissements et coût des nuisances, Rapport dit « Boiteux 2 », Commissariat Général du Plan, 2001
- Guide de l'analyse coûts-avantages de projets d'investissement. Guide préparé pour l'unité chargée de l'évaluation de la DG Politique Régionale, Commission Européenne, 2003
- Eléments de microéconomie, PICARD P., Montchrestien , 1998
- Principes d'économie des transports, Economica, QUINET E., 1998
- Recommandations pour l'évaluation socio-économique des projets de TCSP, CERTU, 2002

## 10 - Coût d'opportunité des fonds publics

Le coût d'opportunité des fonds publics est utilisé dans l'analyse coûts-avantages lors du calcul du bilan socio-économique.

Le coût d'opportunité des fonds publics s'applique sous la forme d'un coefficient multiplicateur (supérieur à 1) appliqué à tout Euro public dépensé ou généré par le projet.

### 10.1 - Concepts

Les projets publics génèrent des coûts et des avantages dont le bilan est pris en compte, lorsqu'ils sont monétarisables, dans la valeur ajoutée nette socio-économique du projet.

Si un projet génère un coût net sur les finances publiques, on considère, dans les méthodes d'évaluation socio-économique, que ce projet doit être financé par des ressources fiscales supplémentaires, i.e. des impôts, de manière à préserver le déficit des finances publiques tel qu'il prévaudrait en l'absence du projet (i.e. dans l'option de référence). A l'inverse, un projet qui génère des recettes publiques nettes, permet une réduction des impôts prélevés.

Or, le prélèvement d'impôts dans l'économie n'est pas sans impacts sur celle-ci. Outre les coûts administratifs de collecte, on doit tenir compte que tout prélèvement distord d'une certaine façon les prix relatifs des biens et services dans l'économie.

Appliquer un coefficient multiplicateur  $(1 + \mu)$  aux dépenses publiques nettes générées par le projet revient à dire que si l'on prélève un euro d'impôt supplémentaire la perte du bien-être collectif sera équivalente à  $(1 + \mu)$  euros : ceci représente le coût marginal des fonds publics.

Divers travaux se sont intéressés à mesurer ce coût marginal des fonds publics. La question de l'impact sur l'économie du prélèvement des impôts est complexe, elle dépend de la nature de l'impôt, de l'existence d'impôts affectés à des politiques spécifiques, du taux de prélèvement obligatoire existant. On estime généralement dans la littérature que ce coefficient peut varier entre 1,15 et 1,50 pour les économies développées suivant l'efficacité de leur système fiscal. J.-J. Laffont donne une fourchette moyenne de 1,3-1,5 pour les pays industrialisés, (*Competition, Information, and Development*, Annual World Bank Conference on Development Economics, avril 1998).

### 10.2 - Application et règles d'utilisation

Le coût d'opportunité des fonds publics est le prix fictif à affecter à tout euro de dépense publique nette dans les calculs de bilan coût-avantage monétarisé.

Toute dépense et toute recette budgétaire publique liée au projet sont affectées de ce même coefficient : c'est la dépense nette qui compte.

Le coût d'opportunité des fonds publics s'applique aux dépenses nettes publiques générées par le projet.

Il importe dans un premier temps de déterminer le périmètre des administrations publiques<sup>2</sup> à prendre en compte, en évitant les double-comptes (le transfert entre administrations publiques est neutre du point de vue du déficit de l'ensemble).

---

<sup>2</sup> On entend par administrations publiques, les organismes l'ensemble des unités institutionnelles dont la fonction principale est de produire des services non marchands (i.e. fournis gratuitement ou à des prix qui ne

Pour appliquer le coût d'opportunité des fonds publics, il faut donc, en théorie, estimer l'impact du projet sur toutes les dépenses et recettes générées par le projet pour l'ensemble de ces administrations publiques. Ceci pose donc la question des ressources fiscales indirectes générées par le projet (au travers de l'impact sur la demande de transports, ou le surcroît d'activités économiques permises par l'amélioration de l'offre de transports, ou encore, les dépenses publiques éventuellement liées aux impacts sanitaires ou sociaux).

Dans la pratique, l'estimation complète des recettes et dépenses publiques indirectes liées au projet est souvent hors d'atteinte de l'évaluateur. Aussi, se limite-t-on aux effets directs, tels que décrits dans la formule suivante :

le bilan coûts-avantages du projet s'écrit schématiquement, sans prise en compte du coût d'opportunité des fonds publics :

$$VAN = -I + \sum \frac{A_t + E_t}{(1 + \alpha)^t}$$

Avec :

I coût d'investissement

$A_t$  avantage net à l'année t

$E_t$  coûts d'entretien et d'exploitation à l'année t

$\alpha$  taux d'actualisation

En supposant avoir estimé les dépenses publiques nettes du projet, le bilan coût-avantages peut se décomposer en la partie du bilan reflétant ces dépenses publiques nettes et la partie du bilan hors impact sur les dépenses publiques.

On suppose que les dépenses publiques nettes actualisées sur la durée de vie du projet s'écrivent :

$$DPN = \sum \frac{DPN_t}{(1 + \alpha)^t}$$

La valeur ajoutée se sépare alors en deux termes :

$$VAN = -DPN + \left[ -I + \sum \frac{A_t + E_t}{(1 + \alpha)^t} + DPN \right]$$

Si l'on applique le coefficient multiplicateur reflétant le coût d'opportunité des fonds publics, le bilan coûts-avantages s'écrit :

$$VAN' = -(1 + \mu).DPN + \left[ -I + \sum \frac{A_t + E_t}{(1 + \alpha)^t} + DPN \right] \quad (\text{formule 1})$$

$$VAN' = -\mu.DPN + VAN$$

sont pas significatifs) ou d'effectuer des opérations de redistribution du revenu et des richesses nationales. Elles tirent la majeure partie de leurs ressources de contributions obligatoires. Le secteur des administrations publiques comprend les administrations publiques centrales, les administrations publiques locales et les administrations de sécurité sociale.

Ceci revient donc à rajouter au bilan socio-économique classique (sans coût d'opportunité des fonds publics), un terme correspondant au coût de distorsion induit par la dépense publique nette DPN.

On peut également simplifier encore le calcul, pour les projets dont les maîtres d'ouvrage publics supportent l'intégralité des dépenses (d'investissement et d'entretien) : dans ce cas, le bilan socio-économique tenant compte du coût d'opportunité s'écrit :

$$VAN' = -(1 + \mu).I + \sum \frac{A_t - (1 + \mu).E_t}{(1 + \alpha)^t} \quad (\text{formule 2})$$

La valeur actualisée nette calculée de cette façon sera appelée « valeur actualisée nette tenant compte du coût d'opportunité des fonds publics ».

Lorsque le critère de choix du projet est que sa valeur actualisée nette soit positive, ceci s'écrit alors :

$VAN$  (sans tenir compte du coût d'opportunité des fonds publics) /  $DPN$  (dépense publique nette)  $> \mu$

Dans l'hypothèse simplificatrice où la dépense publique nette est entièrement reflétée par les coûts (d'investissement, d'entretien et d'exploitation) le critère que la valeur actualisée nette est positive revient à s'assurer que la valeur actualisée nette ainsi calculée (sans prise en compte du coût d'opportunité des fonds publics) par euro public dépensé est supérieure ou égale au coût d'opportunité des fonds publics.

$$\frac{B_{2011}}{G_{2011ht}} = \frac{\text{Bénéfice actualisé en 2011}}{\text{Coût global HT actualisé en 2011}} > \mu \quad (\text{formule 3})$$

Dans tous les cas où la valeur actualisée nette doit être utilisée en soi pour comparer et choisir des projets, et où les coûts sont pris en charge par des acteurs publics et privés, il convient d'utiliser la formule de calcul générale de la valeur actualisée, tenant compte du coût d'opportunité des fonds publics en facteur multiplicatif des dépenses publiques nettes comme indiqué ci-dessus (*formule 1*).

### 10.3 - Points de vigilance

L'application du coût d'opportunité des fonds publics a un effet majeur sur le choix des investissements publics en fonction de leur impact sur les finances publiques. Cette approche conduit en pratique à réduire le nombre de projets rentables et notamment celui des projets à faible capacité d'autofinancement.

De plus, intégrer le coût d'opportunité des fonds publics, en pondérant différemment les dépenses engagées selon l'origine des fonds, peut être un élément déterminant dans le choix de recourir au secteur privé pour réaliser et gérer des infrastructures de transport.

Compte-tenu des limites d'utilisation liées à la difficulté d'estimer l'impact du projet sur les finances publiques d'une part, l'impact distorsif des impôts sur l'économie d'autre part, la valeur et les conditions d'application de ce taux peuvent être amenés à évoluer, y compris suite à des développements méthodologiques.

## 10.4 - Référence bibliographique

- Révision du taux d'actualisation des investissements publics, Rapport du groupe d'experts présidé par Daniel Lebègue, Commissariat Général du Plan, 2005
- Projet d'instruction relative aux méthodes d'évaluation économique des investissements routiers interurbains de mai 2007, Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du territoire, du Tourisme et de la Mer
- Instruction cadre relative aux méthodes d'évaluation économique des grands projets d'infrastructures de transport, mars 2004 (mise à jour en mai 2005), Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du territoire, du Tourisme et de la Mer

## 11 - Externalités : principes de valorisation

Cette partie présente les définitions et méthodes qui sont utilisées pour valoriser les externalités des projets de transport.

La première sous-partie définit les deux grands types d'approches utilisées pour la valorisation des externalités : l'approche coûts-avantages, qui met en balance les avantages et les coûts induits par un projet ; et l'approche coût efficacité qui valorise l'efficacité d'un projet par rapport à un objectif préalablement fixé.

L'appréciation des impacts d'un projet selon l'approche coûts-avantages se fait ensuite selon deux types de méthodes présentées dans la partie suivante, la méthode top-down (descendante), qui part des effets globaux sur un territoire dus à une externalité puis les affecte aux véhicules ; et l'approche bottom up (ascendante) qui déduit le coût marginal l'externalité étudiée à partir des émissions d'un véhicule isolé.

La dernière étape de valorisation des externalités est la monétarisation, pour laquelle il existe différentes méthodes (coûts d'évitement, coûts des dommages, etc.) qui sont détaillées dans la dernière sous-partie de cette partie.

### 11.1 - Définition

**Les coûts externes**, ou externalités, correspondent aux effets de l'action d'un agent économique sur un autre agent qui n'est pas directement impliqué dans cette action, sans qu'il y ait nécessairement de compensation (pas de prise en compte par le marché). Ces externalités peuvent être des nuisances (resp. des gains) pour cet agent ; on parle d'*externalités négatives* (resp. *externalités positives*).

En prenant l'exemple de la pollution locale de l'air, utilisé pour décrire la relation entre coût social et coût privé, il est possible d'illustrer la notion d'externalités dans le secteur des transports. Le coût du déplacement supporté par un automobiliste (coût privé) ne correspond pas au coût supporté par la collectivité pour ce déplacement (coût social) : le coût des risques sanitaires liés à la pollution locale de l'air n'est pas inclus dans le coût supporté par l'utilisateur. Une partie de ce coût peut être intégrée, soit par l'utilisateur (achat d'un véhicule électrique, peu émetteur de polluants, par exemple) soit par la puissance publique (remboursement de médicaments ou de frais d'hospitalisations via la Sécurité Sociale par exemple).

On parle alors d'*internalisation des coûts externes*. Cette internalisation peut aussi être à la charge du maître d'ouvrage de l'infrastructure (obligation réglementaire d'effectuer des aménagements destinés à limiter les effets de la pollution locale par exemple) ou de l'automobiliste (système de tarification basé sur les émissions de polluants par exemple).

### **Définition : coût privé et coût social**

Tout agent économique supporte sur le marché les coûts liés à son comportement (production et consommation). Ces coûts sont dits privés. Certains coûts peuvent toutefois ne pas être pris en compte par le marché ; il s'agit des coûts externes ou externalités. L'ensemble de ces coûts (privés et externes) est appelé *coût social*.

$$\text{coût social} = \text{coût privé} + \text{coûts externes}$$

Cette relation entre coût social et coût privé peut être illustrée avec l'exemple des transports. Un automobiliste qui choisit de se déplacer considère que son déplacement mérite le coût monétaire qu'il implique (frais de carburant et d'entretien, dépréciation du véhicule, péages éventuels, ...) par rapport aux avantages qu'il en retire (gains de temps, gains de sécurité, gains de confort, ...) ; ce coût correspond au coût privé. Ce déplacement entraîne aussi des désagréments, tels que la pollution locale de l'air pour les riverains : il va donc accroître les risques sanitaires liés à cette pollution et les coûts qu'ils occasionnent (achats de médicaments, frais d'hospitalisation, ...). Du point de vue de la collectivité, le coût monétaire du déplacement de cet automobiliste (coût social) est donc plus élevé que celui qu'il consent effectivement. Il y a donc une contradiction entre le comportement individuel optimal de l'automobiliste (les avantages retirés du déplacement sont supérieurs au coût de ce déplacement) et l'optimum social (les prix du marché des transports reflètent le coût social du secteur) ; il s'agit d'une défaillance du marché.

#### **11.1.1 - Approche coûts/avantages**

L'analyse coûts/avantages (ACA), ou coûts/bénéfices (ACB), consiste à mettre en balance les effets bénéfiques et néfastes d'une action, à l'aide d'une échelle de mesure monétaire commune. Cette approche est couramment utilisée par la puissance publique, en tant qu'outil d'aide à la décision. Elle permet de présenter une évaluation des effets d'un projet d'infrastructure (ou d'une mise en place d'une nouvelle politique) et de déterminer si ce projet est acceptable d'un point de vue économique et/ou sociale (opportunité du projet ou de la politique) et dans quelle mesure (rentabilité du projet ou de la politique).

Dans le secteur des transports, l'analyse coûts/avantages consiste à sommer l'ensemble des avantages et des coûts monétaires (ou monétarisés) induits par un projet ou une nouvelle politique, sur la base d'une unité monétaire homogène (euros constant) :

- gains de temps pour les usagers (monétarisés à l'aide de la valeur tutélaire du temps) ;
- variation d'impôts et de taxes pour l'Etat ;
- réductions éventuelles d'émissions de gaz à effet de serre ou de polluants locaux pour la collectivité (monétarisés via les valeurs tutélaires accordées respectivement au carbone et à la pollution atmosphérique) ;
- ...

#### **11.1.2 - Approche coûts/efficacité**

L'analyse coûts/efficacité (ACE) consiste à identifier l'efficacité d'une action, grâce à un objectif préalablement fixé, par rapport au coût de sa mise en œuvre. Cette approche permet de déterminer le coût social minimum (qualifié de valeur optimale, du point de vue économique) à attribuer à cette action pour atteindre l'objectif préétabli.

L'analyse coûts/efficacité est utilisée notamment pour déterminer la valeur de la tonne de carbone (valorisation de l'effet de serre), à partir des objectifs nationaux ou internationaux de réduction des émissions de GES : il s'agit du coût des efforts à consentir pour réduire les émissions au niveau fixé à l'échelle nationale ou internationale (isolation des bâtiments, construction de véhicules moins émetteurs, ...), à la condition que ces coûts soient inférieurs au coût des dommages occasionnés par ces émissions (recherche du coût social minimum).

## 11.2 - Méthodes de valorisation des externalités dans une approche de type coûts -avantages

Il existe deux grands types de méthodes d'évaluation des externalités :

- les méthodes basées sur l'estimation du coût global de l'externalité étudiée due au transport et l'utilisation de modèles d'émissions, dite descendante (top-down approach) ;
- les méthodes fondées sur les caractéristiques particulières de chaque véhicule et l'utilisation de modèles de dispersion, dite ascendante (bottom-up approach).

### 11.2.1 - Méthode top-down

La méthode dite "top-down" vise à évaluer un coût moyen par véhicule des dommages causés par l'externalité considérée, à partir du coût global de la pollution sur un territoire délimité (région, pays, continent).

La première étape de cette méthode consiste donc à mesurer l'exposition à l'externalité sur le territoire (nombre de personnes exposées).

La deuxième étape de l'évaluation consiste à déduire, à partir de l'inventaire de personnes exposées établi précédemment, les impacts de l'externalité étudiée pouvant être attendus. Cette estimation nécessite l'usage de fonctions dose-réponse (les termes « fonction exposition-réponse » ou « fonction concentration-réponse » peuvent aussi être utilisés) basées sur les conclusions d'études épidémiologiques pour les effets sanitaires et d'études d'impact pour les effets sur les bâtiments et les écosystèmes. Ces fonctions donnent l'impact physique sur un récepteur (la population par exemple) d'une absorption de polluant, par rapport à la quantité de polluant absorbée par ce récepteur.

Les impacts identifiés sont ensuite monétarisés, selon l'une des méthodes de monétarisation suivantes :

- **Méthode d'évaluation des dommages** : la valorisation se fait sur la base des dépenses effectuées pour compenser les effets négatifs de l'externalité étudiée générés par le secteur des transports (frais médicaux, pertes de production pendant les éventuels jours d'arrêt maladie, coûts d'entretien des bâtiments dégradés, ...)
- **Méthode des préférences déclarées (évaluations contingentes)** : elle est utilisée, par exemple, pour apprécier la perte de valeur des bâtiments dégradés par l'externalité considérée ou la perte de qualité de vie ;
- **Méthode des préférences révélées** : elle est utilisée en particulier pour apprécier la perte de valeur des bâtiments dégradés par la pollution atmosphérique ou par leur exposition au bruit (**prix hédoniques**).

Au final cette étape de monétarisation fournit le coût global de l'externalité étudiée. Il s'agit de ne retenir de ce coût que la contribution des transports. Cette estimation est généralement effectuée en calculant la part l'externalité étudiée due à ce seul secteur (cette donnée est relativement accessible) et en faisant l'hypothèse que cette part correspond à la contribution des transports. Cette hypothèse présente des limites car les effets des externalités ne sont pas proportionnels aux émissions par les transports (c'est notamment le cas pour la pollution de l'air).

### 11.2.2 - Méthode bottom-up

L'approche dite "bottom-up" est une approche individuelle, qui déduit le coût marginal l'externalité étudiée à partir des effets d'un véhicule isolé. La méthode dite de "cheminement des incidences" (*Impact Pathway Approach*) est couramment utilisée pour mettre en oeuvre cette approche. Elle consiste à reproduire le processus de pollution par un véhicule quelconque, de sa cause initiale (émissions de polluants) à ses conséquences finales (impacts négatifs sur la santé, le bâti et les écosystèmes).

L'application de la méthode de "cheminement des incidences" permet une grande latitude dans le choix du véhicule suivi, qui peut être différencié selon :

- la silhouette : véhicule particulier, poids lourd, ... ;
- le type de moteur et de carburant : puissance du moteur, véhicule essence ou diesel, ... ;
- le style de conduite : fortes accélérations et décélérations, ...

Ainsi, le coût marginal de l'externalité obtenu en résultat est sensible à ces différents paramètres et permet d'isoler ceux ayant une influence sur l'externalité étudiée. Cet aspect de l'évaluation par une méthode bottom-up est intéressant car, contrairement à l'approche top-down, il permet de prendre en compte de nombreuses situations de trafic. Cet aspect peut être utile pour dégager certains besoins de normes visant à limiter les émissions de polluants.

La suite de la démarche est similaire à celle entreprise avec l'approche "top-down" :

- les populations supplémentaires exposées suite à l'ajout du véhicule sont quantifiées, à l'aide des résultats obtenus en sortie de modèles de dispersion et de données de populations ;
- les impacts sur la population d'un véhicule supplémentaire sont ensuite estimés à l'aide de fonctions dose-réponse ;
- les effets sont ensuite monétarisés à l'aide des méthodes de monétarisation présentées dans la description de l'approche top-down (évaluation des dommages, préférences déclarées et/ou préférences révélées).

## 11.3 - Méthodes de monétarisation

### 11.3.1 - Méthodes de préférences déclarées

Les méthodes de préférences déclarées sont des méthodes de monétarisation basées sur des enquêtes par questionnaire auprès des individus. Ces questionnaires ont pour but de recueillir les déclarations des agents (choix entre diverses options hypothétiques) et d'en déduire le coût qu'ils accordent à certains effets induits par une externalité.

### 11.3.2 - Evaluation contingente

Il s'agit d'une méthode de monétarisation basée sur les préférences déclarées : la valeur des effets évalués est estimée grâce à un questionnaire soumis à un échantillon d'agents. Le questionnaire propose plusieurs options hypothétiques pour différentes situations préétablies, parmi lesquelles l'agent doit faire son choix. Ce choix renseigne sur la valeur que l'agent interrogé accorde à une variation de qualité ou de quantité de l'effet évalué et permet d'en déduire des consentements à payer (ou des consentements à recevoir).

Cette méthode d'évaluation présente l'avantage de renseigner sur la valeur d'effets non-marchands (valeur culturelle d'un écosystème par exemple). Elle implique toutefois différents biais liés à la qualité du questionnaire (choix des options hypothétiques et des situations préétablies), à la représentativité de l'échantillon (possibilités de transfert des résultats) et au traitement des réponses (rejet des réponses ne privilégiant pas les intérêts réels des agents).

### 11.3.3 - Méthodes de préférences révélées

Les méthodes de préférences révélées sont des méthodes de monétarisation basées l'observation du comportement des individus. Ces comportements révèlent les préférences des individus, qui sont ensuite monétarisées par observation (directe ou indirecte) du prix de ces préférences sur les marchés. Plusieurs méthodes de monétarisation relèvent de cette approche.

## Méthode des prix hédonistes

Il s'agit d'une méthode de monétarisation basée sur les préférences révélées par les marchés de l'immobilier (variations des prix du foncier par exemple) et du travail (variations des niveaux de salaire), qui sont les références généralement utilisées dans ce type d'études. L'objectif de la méthode des prix hédonistes consiste à isoler l'influence de l'effet non-marchand à évaluer sur le prix du bien ou du service considéré. Les marchés de

L'immobilier ou du travail sont alors utilisés comme substituts aux marchés inexistants de certains effets non-marchands.

La valeur d'un bien immobilier, par exemple, ne dépend pas seulement de ses caractéristiques propres : elle varie aussi en fonction de l'environnement (services à proximité, accessibilité, nuisances subies, ...). Par conséquent, toutes autre chose étant égales par ailleurs, la valeur d'un bien immobilier varie en fonction du niveau d'exposition au bruit ou à la pollution. Cette variation permet d'attribuer un coût à ces nuisances.

### **Coût des dommages**

Il s'agit d'une méthode de monétarisation basée sur la valeur des biens et des services nécessaires pour réparer les effets d'une externalité (coût des frais hospitaliers dus à la pollution de l'air par exemple) est directement déduite de l'observation de leur prix sur les marchés. Cette méthode du coût des dommages est donc simple à mettre en oeuvre, à la condition d'avoir une bonne connaissance quantitative des effets de l'externalité. Elle est toutefois restrictive en ne proposant des valeurs monétaires que pour les effets marchands et en ignorant donc ceux pour lesquels il n'existe pas de marché.

### **Coût de restauration (ou de remplacement)**

Il s'agit d'une méthode de monétarisation basée sur la valeur d'un actif dégradé (resp. détruit) par les effets d'une externalité est directement déterminé par le coût des mesures nécessaires à sa remise en état (resp. à son remplacement). Cette méthode est basée sur la notion de compensation, qui est notamment mise en œuvre pour la destruction des écosystèmes traversés par des infrastructures de transport (reconstitution d'écosystèmes équivalents en surface et en fonction à ceux détruits par exemple).

### **Coût d'évitement**

Le coût d'évitement correspond au coût des mesures qui peuvent être envisagées pour réduire l'impact des effets non-marchands à évaluer :

- coût de la mise en place de murs antibruit pour évaluer le coût des nuisances sonores ;
- coût de l'installation de pots catalytiques sur toutes les voitures neuves pour évaluer le coût de la pollution atmosphérique ;
- ...

Le coût d'évitement ne doit pas être confondu avec le coût des dommages causés par un effet externe : il fournit seulement le prix à payer pour les éviter ou pour les ramener à un niveau jugé socialement acceptable (seuils réglementaires maximaux). Il permet toutefois de se rendre compte de l'intérêt des mesures d'évitement envisagées : en le comparant au coût des dommages, le bénéfice socio-économique d'une mesure peut être évalué (si le coût d'évitement est supérieur au coût des dommages, la mesure ne se justifie pas d'un point de vue socio-économique).

#### **11.3.4 - Pertes de productivité**

Il s'agit d'une méthode de monétarisation basée sur l'évaluation des effets sur la productivité (nombre de jours d'absentéisme dus à des infections respiratoires provoquées par la pollution par exemple). Ces effets sont généralement estimés à l'aide de fonction dose-réponse et valorisés grâce aux prix observables sur les marchés (coût de l'heure sur le marché du travail par exemple).

#### **11.3.5 - Coût d'abattement (ou d'atténuation)**

L'évaluation du coût d'abattement consiste à définir dans le temps la trajectoire de la valeur de la tonne de carbone à retenir pour atteindre un objectif donné. Cette méthode relève de l'approche coût-efficacité. Il faut noter que, en utilisant cette méthode, la valeur de l'externalité augmente quand le volume global des émissions diminue car l'effort de réduction devient plus important. Cette évolution s'oppose à celle obtenue avec l'approche par le coût des dommages, où la valeur diminue quand le volume global des émissions (et par conséquent les dommages qu'elles occasionnent) est en baisse.

## Coûts d'abattement sectoriel

Il faut ajouter que le calcul de la valeur de l'externalité peut être effectué par une méthode des coûts d'abattement sectoriels, par opposition au calcul par le coût d'abattement global. Cette méthode des coûts d'abattement sectoriels est basée sur des objectifs de réduction et des efforts spécifiques pour chaque secteur émetteur (bâtiment, transport,...), plus (resp. moins) contraignant que des objectifs et efforts globaux et fournissant donc une valeur du carbone supérieure (resp. inférieure) à celle obtenue par la méthode globale<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> Le coût d'abattement des émissions de GES est par exemple plus élevé dans le secteur des transports que dans celui du bâtiment (pour atteindre un niveau d'émission équivalent).

## 11.4 - Références bibliographiques

- Transport: pour un meilleur choix des investissements, Rapport dit « Boiteux 1 », Commissariat Général du Plan ,1994
- Transports : choix des investissements et coût des nuisances, Rapport dit « Boiteux 2 », Commissariat Général du Plan, 2001
- Monétarisation des externalités environnementales, Rapport d'études, SETRA, 2010.

## 12 - Durée de vie optimale et valeur résiduelle

La durée de vie optimale peut être définie comme la durée de fonctionnement de l'équipement au terme de laquelle il devient préférable de le remplacer/renouveler.

La valeur résiduelle économique d'un projet de transport correspond à la somme actualisée des avantages nets procurés par le projet à la collectivité, au-delà de sa durée de vie économique.

### 12.1 - Contexte et enjeux

Tout équipement (y compris une infrastructure de transport) est soumise d'une part à un "vieillessement" (qui se traduit par le fait que ses performances baissent car ses coûts d'entretien augmentent), et d'autre part, selon les cas, à un progrès technique (qui se traduit par le fait qu'une nouvelle génération d'équipements est plus performante et/ou moins coûteuse). Ces phénomènes conduisent à déterminer une date à laquelle il est préférable de renouveler l'équipement plutôt que de le conserver.

Comme indiqué précédemment, le bilan coût-avantage s'effectue sur une période donnée. L'application de ce principe soulève cependant deux types de questions : tout d'abord, différentes options de projets ou différents projets pris en compte dans l'option de référence peuvent présenter des durées de vie différentes : comment traiter ces différences? Ensuite, tout choix de période d'actualisation va mécaniquement "tronquer" des durées de vie d'équipements; dit autrement, en fin de période d'actualisation, certains équipements restent en état de fonctionnement, et, en ce sens, leurs "bénéfices" ne seront pas épuisés; et lorsque l'on a à faire à plusieurs projets/équipements, la période d'actualisation ne tronquera pas les durées de vie de la même façon pour tous les équipements.

Il importe donc de "lisser" au maximum ces "effets de bord" ou "effets de troncature" des durées de vie. Pour cela, on a recours d'une part au principe basique qui veut que, face à des durées de vie multiples des équipements, on s'efforce de considérer le plus petit multiplicateur commun de ces durées de vie (mais ceci peut conduire à des périodes d'actualisation très longues), à considérer la durée de vie optimale des équipements, et, lorsque des durées de vie sont tronquées, à considérer des valeurs résiduelles.

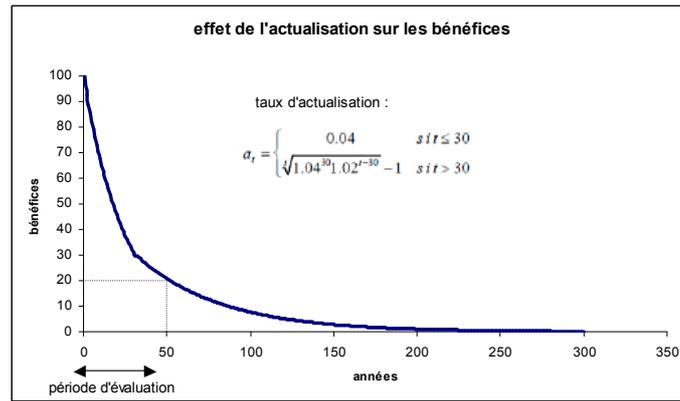
Les paragraphes ci-dessous présentent les concepts sous-jacents à cette approche.

La valeur résiduelle peut être définie de trois manières :

- en considérant la valeur résiduelle de marché de l'actif immobilisé, comme s'il devait être vendu à la fin de la perspective considérée. Pour un projet de transport il s'agit alors de la valeur monétaire du projet (potentiellement obtenue par sa cession) nette des coûts de remise en état. On parle de valeur résiduelle "comptable".
- en considérant la valeur résiduelle de tous les actifs et passifs, sur la base d'une formule de dépréciation économique : cette approche nécessite de calculer une durée de vie optimale fonction du taux de vieillissement de l'infrastructure et des coûts d'investissements et de grosses réparations. On parle dans ce cas de valeur résiduelle "économique" ;
- en calculant la valeur actualisée de chaque recette future nette après la perspective considérée. En d'autres termes, dans ce cas, la valeur résiduelle est la valeur de liquidation.

Dans le cas d'un projet de transport, on utilise la deuxième méthode de calcul de la valeur résiduelle, en calculant une durée de vie optimale en fonction du vieillissement de l'infrastructure et du ratio I/C.

Comme le montre le graphique ci-dessous, la valeur résiduelle d'un projet peut valoir une part importante de la valeur actualisée nette du projet. En effet, le taux d'actualisation tutélaire sans risque est décroissant dans le temps, et les avantages au-delà de la période d'évaluation pris en compte dans le calcul du BNA (50 ans pour les projets routiers) ne sont donc pas négligeables. Il importe donc à la fois de fixer la durée de vie économique optimale du projet et de calculer la valeur résiduelle au-delà de cette période.



## 12.2 - Calcul de la durée de vie économique du projet

Avant de calculer la valeur résiduelle, il est nécessaire de calculer la durée de vie économique du projet considéré. La durée de vie économique doit être optimale, donc telle que la VAN calculée avec une durée de vie économique D+1 est inférieure à la VAN calculée avec une durée de vie économique D, soit :  $VAN_{D+1} < VAN_D$

On peut déduire la durée de vie économique du taux de vieillissement du projet en fonction du rapport I/C en résolvant l'équation suivante :

$$\frac{C}{I_{chaussée}} \left[ \frac{(1+a)^D}{(1+a)^D - 1} \times \frac{1 - \left(\frac{1+v}{1+a}\right)^D}{1 - \left(\frac{1+v}{1+a}\right)} - \frac{(1+a)^{D+1}}{(1+a)^{D+1} - 1} \times \frac{1 - \left(\frac{1+v}{1+a}\right)^{D+1}}{1 - \left(\frac{1+v}{1+a}\right)} \right] + \frac{(1+a)^D [(1+a)^{D+1} - 1] - (1+a)^{D+1} [(1+a)^D - 1]}{[(1+a)^D - 1][(1+a)^{D+1} - 1]} < 0$$

Ainsi, si D=30 ans, on obtient v= 9% pour I/C=200.

### Exemples de coûts à titre indicatif :

Le coût des chaussées I pour le réseau concédé, à titre indicatif, peut varier de :

- Trafic faible 5000 à 8000V/J : 1000 k€<sub>2010</sub>/km
- Trafic limite faible 8500 V/j : 1200 k€<sub>2010</sub>/km
- Trafic normal à fort >10000 V/j : 2000 k€<sub>2010</sub>/km

Le coût d'entretien courant pour le réseau non concédé varie de 5 à 10 k€<sub>2010</sub>/ km.

Les coûts de grosses réparations pour le réseau concédé varient de 40 à 70 k€<sub>2010</sub>/km et varient de 10 à 20 k€<sub>2010</sub>/km pour le réseau non concédé.

### Exemple de valeurs de durée de vie économique en fonction de I/C et v :

		durée de vie économique									
v \ I/C		10	20	30	40	50	100	150	200	300	500
6%		15	20	23	25	28	35	40	43	49	56
8%		12	16	19	21	22	28	32	34	38	44
10%		11	14	16	18	19	24	26	29	32	36
12%		9	12	14	15	17	20	23	25	27	31
14%		8	11	13	14	15	18	20	22	24	27
16%		8	10	11	13	13	17	18	20	22	25
18%		7	9	11	12	12	15	17	18	20	22
20%		7	9	10	11	12	14	16	17	18	21

## 12.3 - Calcul de la valeur résiduelle

La valeur résiduelle calculée dans le cadre de l'évaluation des projets de transports est une valeur résiduelle "économique", donc basée sur le calcul d'une durée de vie optimale.

La chronique des avantages et des coûts d'un projet de transport est réalisée pour une période donnée appelée durée de vie « économique » du projet.

On parle de **VAN sans valeur résiduelle** pour définir la somme actualisée des avantages nets du projet pendant la durée de vie économique du projet.

La **valeur résiduelle économique** d'un projet de transport correspond à la somme actualisée des avantages nets procurés par le projet à la collectivité, au-delà de sa durée de vie économique. La VAN peut alors se décomposer de la façon suivante :

VAN totale ( $VAN_{\infty}$ ) = VAN sans valeur résiduelle ( $VAN_D$ ) + valeur résiduelle (VR)

Si on note

$I_0$  coût d'investissement initial hors coût de la chaussée (acquisitions foncières, études, etc.)

$I_{chaussée}$  coût de renouvellement de la chaussée (toutes les D années)

C coût d'entretien courant (annuel)

$A_t$  avantages à l'année t =  $A \cdot (1+g)^t$  avec g taux de croissance des avantages A

D = durée de vie économique optimale

N = séquences de renouvellement (N->infini)

a taux d'actualisation

v = vieillissement

La valeur actualisée nette du projet est alors, si le taux d'actualisation est indépendant du temps :

$$VAN_{\infty} = -I_0 - I_{chaussée} + \sum_{t=0}^D \frac{A_t}{(1+a)^t} - \sum_{t=1}^D C \times \left(\frac{1+v}{1+a}\right)^t$$

$$- \frac{I_{chaussée}}{(1+a)^D} + \sum_{t=D+1}^{2D} \frac{A_t}{(1+a)^t} - \sum_{t=0}^D \left(\frac{1}{1+a}\right)^D \times C \times \left(\frac{1+v}{1+a}\right)^t$$

$$+ \dots - \frac{I_{chaussée}}{(1+a)^{ND}} + \sum_{t=ND}^{(N+1)D-1} \frac{A_t}{(1+a)^t} - \left(\frac{1}{1+a}\right)^{ND} \times \sum_{t=0}^{D-1} C \times \left(\frac{1+v}{1+a}\right)^t, \text{ avec } N \rightarrow \infty$$

$$\text{Donc } VAN_{\infty} = -I_0 - I_{chaussée} \times \sum_{N=0}^{\infty} \frac{1}{(1+a)^{ND}} + \sum_{t=0}^{\infty} \frac{A_t}{(1+a)^t} - \sum_{N=0}^{\infty} \frac{1}{(1+a)^{ND}} \times C \times \sum_{t=0}^{D-1} \left(\frac{1+v}{1+a}\right)^t$$

## 12.4 - Lien entre valeur résiduelle et durée de vie économique

A partir du calcul de la durée de vie économique du projet et sous les conditions que le taux d'actualisation a et le taux de vieillissement v sont constants, et que  $g < a$ , on peut déduire la valeur résiduelle en fonction de la VAN calculée sur la durée de vie économique :

$$VR = \frac{I_0}{(1+a)^D - 1} + \frac{VAN_D}{(1+a)^D - 1} + \frac{A}{(1+a)^D - 1} \times \frac{(1+g)^D \times \left[ 1 - \frac{2}{(1+a)^D} \right] - 1}{\left( 1 - \frac{1+g}{1+a} \right)}$$

Où D est calculé en fonction du taux de vieillissement et du rapport I/C (voire paragraphe précédent).

On considère dans cette formule que le vieillissement est constant, donc que les réparations effectuées sont homogènes dans le temps, alors que l'on pourrait considérer que la fréquence des réparations et leur type donc vitesse de vieillissement, peut varier. On se place en fait ici dans une situation de choix optimal des fréquences de renouvellement.

## 12.5 - Exemples

Deux projets de déviation concédée sont testés, dont les hypothèses sont résumées dans le tableau ci-dessous, dans lequel les valeurs sont données en M€2010.

Pour chaque projet, on teste des hypothèses pour des durées de vies économiques de 30 ans et 50 ans.

La durée de vie économique de **30 ans** a été calculée avec un **taux de vieillissement de 10%** et **I/C=250**

- Pour le projet 1,  $I_{\text{chaussée}} = 65$  M€2010, donc  $C = 4$  M€2010

- Pour le projet 2,  $I_{\text{chaussée}} = 24$  M€2010, donc  $C = 10$  M€2010

La durée de vie économique de **50 ans** a été calculée avec un **taux de vieillissement de 5%** et **I/C=200**

- Pour le projet 1,  $I_{\text{chaussée}} = 65$  M€2010, donc  $C = 3$  M€2010

- Pour le projet 2,  $I_{\text{chaussée}} = 24$  M€2010, donc  $C = 8$  M€2010

projet 1				projet 2			
Coût d'investissement	240	trafic	10 000 V/j	Coût d'investissement	100	trafic	6 000 V/j
I0	175	longueur	55 km	I0	76	longueur	25 km
A	110	$I_{\text{chaussée}}$	65	A	14	$I_{\text{chaussée}}$	24

		g=0%	g=0.5%	g=1%			g=0%	g=0.5%	g=1%
D = 50 ans	VAN D	600	600	600	VAN D	122	122	122	
	VR	127	278	529	VR	32	52	84	
	VR/VAND	21%	46%	88%	VR/VAND	27%	42%	69%	

Pour ces deux projets, on observe donc que le taux de croissance des avantages a un impact important sur la valeur résiduelle, il faut donc être attentif aux taux de croissance définis pour les avantages du projet considéré. De plus, la part de la valeur résiduelle va également varier selon le projet considéré, et peut, sous les hypothèses simplificatrices prises dans les exemples précédents, valoir jusqu'à 88% de la VAN calculée jusqu'à la fin de la durée de vie économique du projet.

## 13 - Prise en compte de la fiabilité dans le coût du temps de transport

### 13.1 - Les modèles de choix d'horaire (planification ou écart horaire)

Les choix de déplacements des usagers sont motivés par un motif de déplacement (activité à destination) et un horaire d'arrivée planifié. Le choix de l'horaire de départ résulte des arbitrages effectués entre la valeur de l'activité à l'origine, le temps d'attente à l'arrivée et la valeur de l'activité à destination.

Ce modèle donne le coût du temps  $C$  pour un usager partant à l'horaire  $t$  et souhaitant arriver à l'horaire  $t^*$  :

$$C(t) = \alpha \cdot \mu(t) + \beta \cdot SDE(t) + \gamma \cdot SDL(t)$$

avec  $\mu(t)$  le temps moyen du trajet en fonction de l'horaire de départ  $t$ , qui suit une loi de distribution aléatoire  $T_t$

SDE l'écart à l'avance par rapport à l'horaire prévu, défini par  $SDE(t) = \max(0, t^* - (t + \mu(t)))$

SDL l'écart au retard par rapport à l'horaire prévu, défini par  $SDL(t) = \max(0, (t + \mu(t)) - t^*)$

$\alpha$  la valeur du temps de trajet,  $\beta$  la valeur du temps d'arrivée en avance et  $\gamma$  la valeur du temps d'arrivée en retard (ces paramètres sont spécifiques à chaque usager : ils dépendent en particulier de leurs caractéristiques socio-économiques).

Le terme  $\beta \cdot SDE + \gamma \cdot SDL$  constitue le surcoût du temps lié au manque de fiabilité des temps de transport pour les usagers.

*NB : Les arrivées en retard et les arrivées en avance sont distinguées et valorisées à des niveaux différents dans le modèle de choix d'horaire, afin de permettre une meilleure représentation des choix de déplacement des usagers en fonction de leurs préférences (l'aversion au risque d'avance ou de retard varie en fonction du motif de déplacement par exemple).*

Un surcoût  $\theta$  est parfois accordé aux arrivées en retard, indépendamment de la durée de ce retard (la durée de ce retard est valorisé par ailleurs via le paramètre de coût  $\gamma$ ). Pour un usager optimisant son horaire de départ et souhaitant arriver à l'horaire  $t^*$ , le coût du temps  $C$  s'écrit alors :

$$C = \alpha \cdot \mu + \beta \cdot SDE + \gamma \cdot SDL + \theta \cdot P_L$$

avec  $P_L$  la probabilité d'arriver en retard (au-delà de la marge de sécurité prise par les usagers)

Le tableau suivant (tableau 5) indique quelques ordres de grandeurs pour le coût du temps perdu  $\gamma$  par rapport au coût du temps gagné  $\beta$  et à la valeur du temps  $\alpha$  :

Publications	$\gamma / \beta$	$\gamma / \alpha$
Small, 1982	3,9	2,4
Small et al., 1999	11,1 pour moins de 5 min d'avance 4,0 pour une avance de 5 à 10 min 2,4 pour une avance de 10 à 15 min	4,8
De Palma et Fontan, 2001	4,9	1,8
Tseng et al., 2005	3,1 pour des retards « anticipables » 4,2 pour des retards imprévus	1,5 pour des retards « anticipables » 2 pour des retards imprévus

Hollander, 2005	2,8	2,1
Asensio et Matas, 2007	4,9	2,3

Tableau 5 : Coût du temps gagné et coût du temps perdu extraits de différentes études (SETRA, 2012)

### 13.2 - Les modèles moyenne-variance (*mean-variance*)

Les usagers subissent des coûts supplémentaires (désorganisation des agendas et désagrément lié aux temps d'attente) lorsque leur temps de parcours est affecté par des variations imprévisibles (ce qui exclut les perturbations liées à la congestion journalière). Ils effectuent donc, pour leurs choix de déplacements, des arbitrages entre la durée moyenne de leur parcours et le risque de subir un retard imprévu. Le modèle moyenne-variance propose un coût du temps C établi à partir de données de temps de parcours, qui prend en compte ces arbitrages :

$$C = \alpha \cdot \mu + \lambda \cdot \sigma$$

avec une distribution des temps de parcours (celle-ci est supposée constante dans le temps) de moyenne  $\mu$  et de variance  $\sigma^2$

$\alpha$  la valeur du temps de trajet et  $\lambda$  le coût de la variabilité des temps de trajet

Le terme  $\lambda \cdot \sigma$  constitue le surcoût du temps lié au manque de fiabilité des temps de transport pour les usagers et représente donc leur aversion au risque sur le temps de parcours.

Cette méthode présente deux principales limites. D'une part, elle traite de façon symétrique les temps, ce qui en permet donc pas de représenter l'asymétrie des temps de parcours. D'autre part, elle représente une dispersion moyenne du temps de parcours, ce qui ne permet pas de rendre compte des longs retards exceptionnels.

On peut noter que ce modèle est en fait une simplification du modèle de choix d'horaire.

### 13.3 - Ratio de fiabilité (*reliability ratio* ou *reliability multiplier*)

Le ratio de fiabilité RR est défini par le rapport entre le coût de la variabilité du temps de trajet  $\lambda$  et le coût du temps de trajet  $\alpha$  :  $RR = \lambda / \alpha$ . Ce ratio dépend, d'une part, de la forme de la distribution des temps de parcours T et, d'autre part, de l'aversion des usagers aux risques d'avance et de retard.

Souvent, dans les modèles moyenne-variance le coût du temps C s'exprime en fonction d'un ratio de fiabilité RR :

$$C = \alpha \cdot (\mu + RR \cdot \sigma)$$

Le tableau ci-dessous présente quelques valeurs du ratio de fiabilité issues de la littérature.

Sources	Valeurs de ratio de fiabilité
Bates et al., 2001	1,3
Hamer et al., 2004	0,8
Eliasson, 2004	[0,49 ; 0,95] pour la variabilité quotidienne des temps de parcours [3,5 ; 5,3] pour les longs retards imprévus

Small et al., 2005	[0,95 ; 1,40]
Hollander, 2005	0,7
Asensio et Matas, 2007	0,98
Passenger Demand Forecasting Handbook (1984)	2,5
De Palma (1996)	2,7
Rietveld et al. (2001)	2,5
Wardman (2001)	Valeur moyenne = 7,4 et intervalle à 80%= 2 – 14
Passenger Demand Forecasting Handbook (2005)	3,0 (longue distance 3,9 – 5,5)
Kroes & Duchâteau (2006)	<p>Pendulaires domicile-travail :</p> <p>retards de 5 à 15 min : 5 – 9</p> <p>retards de 15 à 60 min : 4 – 5</p> <p>Autres motifs :</p> <p>retards de 5 à 15 min : 4 – 12</p> <p>retards de 15 à 60 min : 5 – 6</p>
Abrantes & Wardman (2011)	Valeur moyenne = 6,4 avec un écart-type = 3,8
Börjesson & Eliasson (2011)	<p>Fréquence de retard de 5% : 7 – 17</p> <p>Fréquence de retard de 20% : 4 – 9</p>

*Source : revues de la littérature effectuées par RFF (2012) et le SETRA (2012)*

## 13.4 - Bibliographie

- Les temps de parcours – Estimation, diffusion et approche multimodale, CERTU, 2008
- Domaine d'emploi des mesures de régulation dynamique du trafic – Propositions de critères d'analyse pour application au sillon lorrain et au sillon rhénan, Rapport d'études, CETE de Lyon, 2010 .
- Information routière temps réel – Évaluation des impacts, Rapport d'études, CETE de Lyon, 2011
- Transports : choix des investissements et coût des nuisances, Rapport dit « Boiteux 2 », Commissariat Général du Plan, 2001
- Fiabilité des transports : quelques éléments d'analyse économique, Document de travail, DELACHE X, 2008
- Fiabilité des temps de parcours, Eléments de valorisation économique, Rapport d'études, SETRA, 2012

## 14 - Prise en compte du risque dans le calcul économique

Un projet de transports consiste en une décision de construire un objet de fonctionnalités données dans un environnement donné. Cet environnement est caractérisé par les conditions économiques (coûts, prix, demande, comportements des modes concurrents), mais aussi naturelles, technologiques, sociales. Le risque auquel est exposé le projet joue, schématiquement, à deux niveaux :

- les conditions dans lesquelles a été évalué le projet sont, de fait, aléatoires : la demande de transports, les coûts, les prix relatifs, la croissance,.... ne sont pas connus de façon certaine durant toute la vie du projet : ci-dessous, ces sources d'aléas seront qualifiées de « risques économiques », ce sont les risques dont il est question dans cette partie ;
- des aléas peuvent affecter le fonctionnement du système de transports une fois qu'il est en place, voire pendant sa phase de construction : aléas naturels, industriels, actes malveillants.

La question de la décision publique en situation de risque ou d'incertitude fait l'objet de nombreux travaux théoriques et, de plus en plus, de débats publics. Ceci illustre le fait que de nombreuses incertitudes, qu'elles soient de nature sociale, environnementale ou économique, rendent les décisions publiques difficiles et requièrent des méthodologies, des outils et des processus de décision adaptés.

La prise en compte explicite du risque et des incertitudes constitue un élément assez nouveau dans l'évaluation des projets de transport. Dans la plupart des cas, les incertitudes sur les variables ne sont pas prises en compte, le raisonnement étant basé sur des variables déterministes.

Cette partie traite des risques probabilisables de nature socio-économique (i.e. affectant la demande, les coûts, les valeurs monétaires utilisées dans l'évaluation socio-économique, etc...).

Pour plus de détail sur les modèles appliqués dans cette partie, se référer au rapport du Sétra (2012).

Cette partie rappelle le cadre théorique et en particulier les principales notions nécessaires à la prise en compte du risque dans le calcul socio-économique ; elle fait notamment le lien entre l'analyse économique du risque, et les analyses classiquement utilisées dans les risques naturels et technologiques, qui sont complémentaires ; dans cette partie, l'approche sous-jacente est celle de la maximisation de l'espérance de l'utilité (dite de "Von Neuman – Morgenstern"), qui fournit une formulation simple, utilisable directement dans le calcul du bilan coût-avantage monétarisé, telle qu'appliquée dans l'évaluation de projets au sein du Ministère.

### 14.1 - Cadre théorique

#### 14.1.1 - Éléments de définition

Les notions de risque et d'incertitude doivent être distinguées : le risque qui est calculable et l'incertitude dont la probabilité numérique est incalculable. Il s'agit de risque si l'incertitude relative à un événement est définie par une distribution de probabilités objectives. Des probabilités sont objectives si elles sont établies à partir d'une information statistique issue d'enquêtes - observations ou de la modélisation d'une situation. On parle alors de risque avéré par opposition à un risque potentiel ou une incertitude qui ne peuvent pas être définis par des probabilités objectives. L'incertitude fait référence à un futur dont la distribution d'états n'est pas connue ; le phénomène mis en jeu demeure indéterminé. L'incertitude peut aussi être définie comme l'absence de connaissances spécifiques, ou des paramètres qui caractérisent le système physique que l'on veut modéliser (Rikken et al.2002).

Il est important également de distinguer les risques et incertitudes en fonction de la façon dont ils peuvent être maîtrisés ; s'agissant de ce que maîtrise a priori l'évaluateur, on peut citer différentes catégories :

- risques qui relèvent d'un défaut de mesure (ou de modélisation - prévision) que l'évaluateur peut réduire par son propre effort d'évaluation ;
- risques « objectifs » (indépendamment des défauts de mesure), probabilisables ;
- incertitudes (non probabilisables) qui peuvent être levées par la conduite du projet lui-même (choix de la date de mise en service, tests, expérimentations) ;
- incertitudes (non probabilisables) qui peuvent être levées par des efforts (de recherche, d'expérimentation) qui sont en dehors du strict champ de la conduite du projet lui-même et de son évaluation.

Dans la suite de cette partie, on se limitera à la notion de risque, supposant connues et objectives les probabilités attachées aux aléas affectant le projet. La question de la décision en situation d'incertitude (non probabilisée), de même que la question des risques subjectifs ou celle de l'accumulation de la connaissance sur les risques avec le temps (qui fonde notamment la théorie des valeurs d'option), ne sont pas traitées dans cette partie.

### 14.1.2 - Typologie des risques, lien avec l'analyse de risque

Les risques auxquels sont soumis les projets de transports sont divers. Le tableau suivant illustre la diversité des risques auxquels peut être soumis un projet de transports, en dégagant trois principales catégories de risques : les risques dits « physiques » (naturels, industriels), les risques liés à l'environnement socio-économique, les risques reflétant des « erreurs » dans la connaissance et/ou la modélisation des impacts du projet, étant entendu qu'il est parfois difficile de distinguer ces deux dernières catégories.

Origine ou nature de l'aléa	Composantes du projet affectées
<i>Risques « physiques »</i>	
Risques naturels, technologiques - industriels	Fonctionnalités transports (temps de parcours, niveau de service, fiabilité) + vie humaine + impacts sanitaires ; impacts environnementaux et sanitaires
<i>Risques « socio-économiques »</i>	
Facteurs socio-démographiques Facteurs économiques (PIB, prix de l'énergie) Prix des modes ou opérateurs concurrents	Coûts de construction Coûts d'entretien Coûts d'exploitation Demande de transports Impacts environnementaux et sanitaires
<i>Erreurs sur les paramètres d'évaluation et/ou de modélisation (exemples)</i>	
Valeur du temps Modèles de demande / de trafic Emissions de nuisances (en volume) Exposition et impact des nuisances Valeur monétaire des nuisances Incidences sur l'accidentalité Valeur de la vie humaine	Demande de transports Valeur monétarisée des impacts

Le projet consiste en une décision de construire un objet de fonctionnalités données dans un environnement donné. Prendre en compte le risque conduit à prendre en compte des aléas jouant à la fois sur l'environnement de l'objet et sur ses fonctionnalités. Ceci conduit à catégoriser les aléas selon qu'ils portent sur :

- les caractéristiques du projet : exemples : retard de mise en service, défauts de construction ;
- les états du monde : exemples : scénario de croissance économique, distribution de probabilité de la pluviométrie ;
- l'impact du projet : exemples : attractivité du projet vis à vis de la demande, vulnérabilité aux aléas naturels.

Enfin, il peut être utile d'identifier les risques qui portent sur des acteurs particuliers. En effet, si le choix de projet en situation de risque s'intéresse en général au risque attaché à la valeur agrégée du projet pour la société (valeur dite « socio-économique »), les agents ne sont pas tous affectés de la même façon par les risques attachés au projet. Deux catégories d'agents méritent une attention particulière :

- les agents dits « vulnérables » c'est à dire ceux pour lesquels certaines réalisations de l'aléa génèrent des impacts élevés qui ne sont pas pris en charge par les mécanismes d'assurance ou de mutualisation des risques existants ;
- les agents directement impliqués dans la décision de faire ou ne pas faire le projet : le fait que ces agents (par exemple un concessionnaire) supportent un risque particulièrement élevé par rapport aux critères de décision qu'ils utilisent habituellement, peut en effet les conduire à refuser un projet alors que ce projet est acceptable compte tenu de son risque pour l'ensemble de la société.

Il peut être utile, à cette étape de présentation, de faire référence à l'analyse de risque, telle qu'elle est classiquement utilisée dans les risques naturels ou industriels et qui, schématiquement, définit le risque comme la combinaison de trois facteurs :

- l'aléa
- la vulnérabilité
- l'impact

L'aléa représente les origines du risque (naturel, industriel, intentionnel). Il est, selon les cas, en partie maîtrisable par le gestionnaire.

La vulnérabilité représente le lien entre l'intensité de l'aléa et la variation des caractéristiques de l'objet affecté. Il s'agit par exemple des liens entre une intensité de précipitation et la disponibilité (physique) d'un réseau de transporteur en cas d'inondation. La vulnérabilité dépend d'enchaînements de mécanismes physiques (ex : précipitation → hauteur d'eau) mais aussi des mesures de prévention ou protection des infrastructures mises en place (ex : digues).

L'impact représente le lien entre les variations des caractéristiques de l'objet et la façon dont les agents ou milieux naturels en sont affectés. On distingue en général l'impact en termes de vies humaines (y compris mortalité) et l'impact en termes de pertes des usages de l'objet (ruptures d'itinéraires de transports, baisse de production d'un site industriel, etc...). L'impact dépend d'éventuelles mesures de protection qui peuvent distendre ou amortir les incidents sur les personnes, et les milieux naturels. En ce sens, la gestion de la crise fait partie des mesures de protection.

Cette démarche d'analyse de risque constitue une approche complémentaire au cadre de l'analyse socio-économique qui sera développée ci-après, et ce à deux égards :

- d'un côté, l'analyse socio-économique se concentre principalement sur les aléas socio-économiques, et sur certains paramètres de modélisation / évaluation (même si l'analyse économique peut, en théorie, prendre en compte les risques « physiques », et notamment les risques de rupture de service des infrastructures ;
- de l'autre côté, l'approche aléa → cible → impact doit être conservée en tête dans le cadre de l'analyse socio-économique, car elle est transposable à l'identification, puis la quantification des enchaînements (ou des liens de causalité) qui sont nécessaires à l'analyse socio-économique.

### 14.1.3 - Décision et risque : utilité, aversion pour le risque et prime de risque

Les êtres humains sont, en général, averses au risque c'est-à-dire qu'ils font preuve d'une certaine réticence face au risque. L'aversion au risque dépend des préférences de l'individu face à une situation de risque.

On peut illustrer cette aversion par l'exemple de la loterie : on suppose que l'on propose à un individu une loterie dont le gain est égal à  $X_1$  avec une probabilité  $\frac{1}{2}$  ou  $X_2$  avec une probabilité de  $\frac{1}{2}$ . Si l'on propose à cet individu un gain certain  $(X_1+X_2)/2$  avec une probabilité égale à 1, très généralement, l'individu va préférer le gain certain. L'individu devrait même être disposé à accepter un gain inférieur au gain  $(X_1+X_2)/2$ , dès lors que ce gain est certain, plutôt que la loterie initiale.

La formalisation de l'aversion pour le risque développée ci-dessous (cf. encadré) permet précisément d'appréhender cette notion, et d'estimer le consentement de l'individu à réduire ses gains (certains) plutôt que d'affronter le risque de la loterie. Ce consentement de l'individu à réduire ses gains est défini comme la prime de risque qu'il est prêt à payer pour réduire le risque (ici, le réduire à zéro).

Le cadre général de la représentation du risque dans les comportements des agents suppose que les agents économiques cherchent à maximiser l'espérance de l'utilité retirée de leurs actions (Morgenstern et Von Neumann).

#### Encadré : décision en situation de risque : formulation de Von Neuman Morgenstern

On suppose qu'un agent doit décider entre  $Q$  actions  $a_1, \dots, a_q, \dots, a_Q$ , en situation de risque.

Ce risque est caractérisé par  $N$  états possibles de la nature, de probabilité:  $p_1, \dots, p_n, \dots, p_N$ .

Chaque action  $a_q$  donne lieu, dans l'état de la nature  $n$ , à une utilité ou état de richesse :  $U(a_q, n)$ .

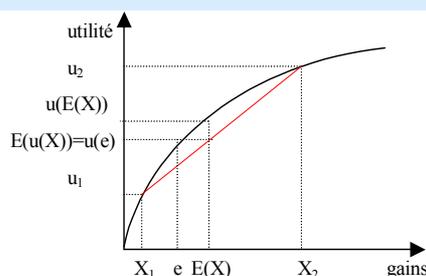
Alors le théorème de Von Neumann – Morgenstern (1949) indique que la décision de l'agent consiste à choisir l'action  $a$  qui maximise l'espérance de son utilité :

$$\text{Max}_{\{a_q\}} \sum_n p_n U(a_q, n)$$

On considère maintenant un agent caractérisé par un niveau de bien être  $X$ , lui même soumis à des aléas de loi de probabilité de densité  $f(X)$ . On note  $E(X)$  l'espérance de l'utilité selon cette loi de probabilité. L'aversion pour le risque caractérise le fait que les agents préfèrent généralement, comme indiqué plus haut, un bien-être certain au même bien-être risqué. L'aversion pour le risque peut être illustrée à partir du schéma ci-dessous.

On représente l'utilité liée au gain  $X$ , qui est égal à  $X_1$  avec une probabilité  $\frac{1}{2}$  ou  $X_2$  avec une probabilité de  $\frac{1}{2}$ .  $U(E(X))$  est donc égal à  $u_1$  avec une probabilité  $\frac{1}{2}$  ou  $u_2$  avec une probabilité de  $\frac{1}{2}$ . On a :  $E(u(X)) = \frac{1}{2} \cdot (u_1 + u_2)$ .

Avec une fonction d'utilité concave (i.e. l'utilité marginale décroît avec le niveau de bien-être ou de consommation) on a donc :  $E(u(X)) < u(E(X))$ .



On peut exprimer cet écart entre l'espérance de l'utilité et l'utilité de l'espérance en introduisant la notion d'équivalent certain et de prime de risque.

L'équivalent certain des gains  $X$  est le niveau de bien-être  $e$  tel que l'espérance de l'utilité des gains  $X$  est égale à l'utilité de l'équivalent certain, soit  $u(e) = E(u(X))$ .

On a, en général, avec une fonction d'utilité concave :  $e < E(X)$  : l'équivalent-certain du bien-être est inférieur à l'espérance de bien-être : on retrouve bien l'intuition selon laquelle un individu préfère un niveau de bien-être certain plus faible que l'espérance d'un niveau de bien-être incertain.

La différence entre l'espérance du bien-être et l'équivalent-certain de ce bien-être s'interprète comme le consentement à payer d'un agent pour disposer d'une certitude sur son niveau de bien-être. On désigne alors cette différence par la prime de risque.

Dans l'expression ci-dessus, si l'on note  $\Pi$  la prime de risque, elle est déterminée comme suit :

$$E[U(X)] = U(e) = U[E(X) - \Pi]$$

L'aversion pour le risque d'un individu est étroitement liée à la forme de sa fonction d'utilité : plus celle-ci sera concave, plus il présentera une aversion élevée au risque. On définit alors l'aversion relative au risque au niveau de bien-être  $X$  pour l'individu considéré comme :

$$\gamma = \frac{-E(C).u''(C)}{u'(C)}$$

En situation de neutralité face au risque,  $\gamma=0$ .

Il est important de noter que l'aversion au risque d'un individu dépend a priori du niveau de bien-être considéré.

#### 14.1.4 - Mesures de l'aversion au risque

Les individus se caractérisent par des aversions pour le risque qui leur sont spécifiques (et sont également spécifiques au niveau de « gain » - donc de consommation ou de richesse) auquel on s'intéresse.

Ceci est vrai déjà pour des aléas caractérisés par des probabilités objectives.

Mais, au delà, les individus se construisent une représentation subjective des probabilités réelles. De nombreux travaux ont porté sur la perception des risques par les individus, et notamment des risques de faible probabilité : on constate souvent que les événements de faible probabilité voient leur probabilité sous-estimée par les individus. On parle d'ambiguïté lorsque la loi de probabilité est subjective, c'est-à-dire qu'elle est estimée par l'individu selon ses croyances, qu'il ait ou non des informations sur la distribution objective et la nature de l'espace des probabilités

Les agents préfèrent également connaître les probabilités de la situation risquée dans laquelle ils prennent leurs décisions, plutôt que de rester dans l'ignorance de leur valeur objective c'est-à-dire en situation d'incertitude. Cette situation correspond à une aversion pour l'ambiguïté.

Il existe des différences entre les mesures individuelles et collectives de l'aversion au risque. En général, le groupe a une capacité à supporter les risques qui est supérieure à celle d'un individu isolé. Ceci tend à modérer l'aversion collective pour le risque. D'un autre côté, la pression sociale peut conduire les individus à se conformer à certaines normes de comportement, conduisant alors à un alignement sur l'aversion la plus répandue ou celle des "leaders" du comportement.

La collectivité reste tout de même aversive au risque. Cette aversion au risque justifie l'incorporation de primes de risque dans l'évaluation des projets publics.

Plusieurs méthodes existent pour calculer l'aversion au risque de la collectivité, de nombreux travaux ayant été effectués. Les méthodes de calcul de l'aversion pour le risque sont basées soit sur les préférences individuelles, auquel cas elles doivent être corrigées pour être applicables à un risque pour la collectivité sur la richesse, soit sur la demande sur des biens tels que l'alimentation, considérés comme ayant une valeur collective marquée, soit sur des préférences révélées par les gouvernements au travers de leurs choix. Les valeurs trouvées se situent en général entre  $\gamma = 0,5$  à  $3,5$ .

Dans la suite de cette partie, on supposera connue l'aversion pour le risque de la collectivité pour son bien-être. On supposera également, pour simplifier, que le bien-être s'exprime de façon univoque dans un indicateur monétarisé (par exemple, la consommation finale des ménages ou le PIB).

## 14.2 - Risque et bilan coût-avantage socio-économique

Cette partie présente l'application du cadre de Von Neumann – Morgenstern (maximisation de l'espérance de l'utilité) à l'évaluation socio-économique de projet fondée sur le bilan coût-avantage monétarisé et actualisé. Dans un premier temps, elle s'intéresse à la décision de faire (ou ne pas faire) un projet caractérisé par un surcroît potentiel de bien-être, en tenant compte de ce que le bien-être et le projet sont tous deux soumis à des aléas, et corrélés. Dans un second temps, cette partie introduit la notion d'actualisation, pour tenir compte de ce que les effets du projet (coûts et avantages), sont séquencés dans le temps.

### 14.2.1 - Utilité d'un projet affectant le bien-être en présence de risque

Soit  $C$  le niveau de bien-être sans projet (par exemple la consommation agrégée dans le cas de la collectivité).  $C$  est une variable aléatoire dont la loi de probabilité est supposée connue ; on peut se faire l'idée de  $C$  comme représentant le PIB ou la consommation finale des ménages, ou tout autre indicateur monétarisé illustrant le "bien-être" de la collectivité.

Soit  $X$  le projet :  $X$  représente à la fois les coûts et les avantages escomptés, qui affectent (en plus ou en moins) la consommation de la collectivité.  $X$  est également une variable aléatoire de loi de probabilité connue.

Généralement, les variables aléatoires  $X$  et  $C$  ne sont pas indépendantes. On suppose que  $C$  et  $X$  s'expriment dans une unité (monétaire) connue et sont additifs.

Avec cette formalisation, la collectivité, ayant une richesse  $C$  et un projet qui rapporte des gains  $X$ , va donc chercher à maximiser  $E(u(C + X))$ , s/c  $E(u(C + X)) > E(u(C))$ .

Si  $X$  est petit devant  $C$  (i.e. si le projet est marginal par rapport au PIB, ce qui est généralement le cas), la transposition du cadre ci-dessus à la décision (par un décideur public dénommé ci-après "la collectivité") d'un projet peut se formuler de la façon suivante :

$$E(u(C + X)) \approx E(u(C) + u'(C).X)$$

$$E(u(C + X)) \approx E(u(C)) + E(u'(C).X)$$

$$E(u(C + X)) = E(u(C)) + E(u'(C)).E(X) + \text{cov}(u'(C); X)$$

### 14.2.2 - Prise en compte de la temporalité des flux

La valeur d'un projet, pour un agent (ou la collectivité) dont la fonction d'utilité est  $U$ , s'exprime comme la valeur actualisée de l'espérance intertemporelle de l'utilité, espérance calculée sur l'espace de probabilités des événements de chaque période  $t$ .

En notant  $X_1, \dots, X_t, \dots, X_T$  les flux liés au projet pour chaque année  $t$  et  $C_1, \dots, C_t, \dots, C_T$  la richesse de la collectivité à chaque année  $t$ ,  $\delta$  le taux de préférence pure pour le présent, on obtient :

$$\sum_{t=0}^{\infty} \frac{E[u(C_t + X_t)]}{(1 + \delta)^t} = \sum_{t=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{(1 + \delta)^t} \cdot (E(u(C_t)) + E(u'(C_t))E(X_t) + \text{cov}(u'(C_t); X_t)) \right]$$

Un projet est intéressant si  $E(u(C + X)) \geq E(u(C))$ , soit :

$$\sum_{t=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{(1 + \delta)^t} \cdot (E(u'(C_t))E(X_t) + \text{cov}(u'(C_t); X_t)) \right] \geq 0$$

On peut donner une formulation analytique simplifiée de l'espérance de l'utilité ci-dessus, avec certaines hypothèses sur la forme de cette fonction d'utilité.

Le critère de l'espérance de l'utilité étant :

$$\sum_{t=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{(1 + \delta)^t} \cdot (E(u'(C_t))E(X_t) + \text{cov}(u'(C_t); X_t)) \right] \geq 0$$

On peut lui appliquer un développement au second ordre :

$u'(C_t) = u'(E(C_t)) + [C_t - E(C_t)]u''(E(C_t))$ , on obtient

$$\begin{aligned} & \sum_{t=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{(1 + \delta)^t} \cdot ((E(u'(E(C_t))) + [C_t - E(C_t)]u''(E(C_t)))E(X_t) + \text{cov}(u'(E(C_t)) + [C_t - E(C_t)]u''(E(C_t)); X_t)) \right] \\ & = \sum_{t=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{(1 + \delta)^t} \cdot ((u'(E(C_t))E(X_t) + u''(E(C_t))\text{cov}(C_t; X_t)) \right] \end{aligned}$$

En notant  $\gamma = \frac{-E(C)u''(E(C_t))}{u'(E(C_t))}$ , aversion au risque de la collectivité, supposée constante quelque soit  $t$ , on obtient :

$$\sum_{t=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{(1 + \delta)^t} \cdot u'(E(C_t)) \left( E(X_t) - \gamma \frac{\text{cov}(C_t; X_t)}{E(C_t)} \right) \right] \text{ le bénéfice actualisé équivalent certain.}$$

**Encadré : lien avec l'approche du rapport Lebègue**

Dans le rapport Lebègue, le coefficient d'actualisation dit "sans risques" correspond à l'ensemble  $\frac{1}{(1 + \delta)^t} \cdot u'(E(C_t))$ .

Pour intégrer l'incertitude sur la croissance,  $n$  valeurs  $\mu_i$  de probabilité respective  $p_i$  ont été considérées, ce qui donne

$$E(u'(c_t)) = \sum_{i=1}^n p_i e^{-\gamma \mu_i}$$

On peut en déduire le taux d'actualisation dit "sans risques"  $r_t$  :  $r_t = \delta - \frac{1}{t} \ln \left[ \sum_{i=1}^n p_i e^{-\gamma \mu_i} \right]$

L'incertitude sur la croissance est traitée par l'introduction de deux scénarii de croissance : un scénario de croissance à 0,5% avec probabilité 1/3 et un scénario à 2%, avec probabilité 2/3.

### 14.2.3 - Retour au bilan coût-avantage actualisé non risqué

La présentation ci-dessus peut-être simplifiée dans l'hypothèse où le projet présente des gains négligeables par rapport au PIB, et où l'utilité marginale de la consommation est constante (égale à 1 : i.e. pas d'aversion pour le

risque), soit  $\frac{\partial u}{\partial C} = 1$ .

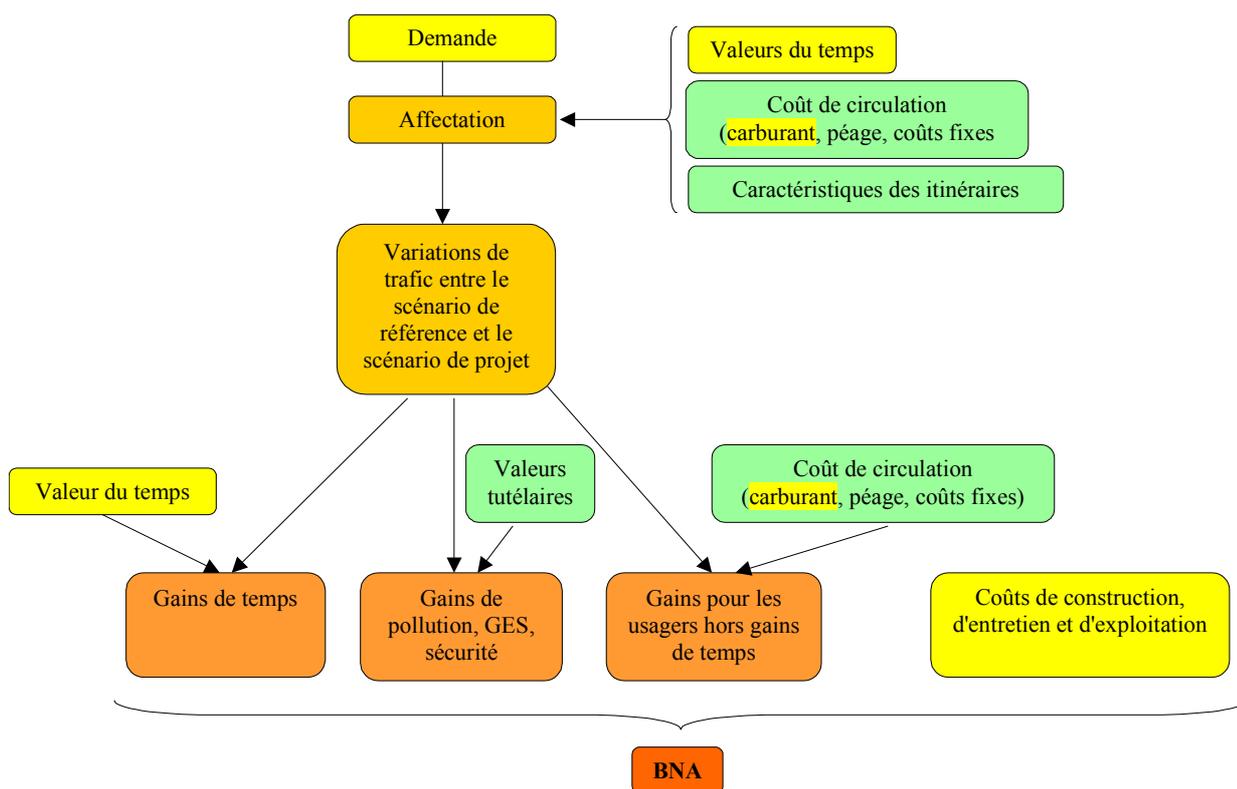
On note qu'alors on retrouve le critère de maximisation de l'espérance des gains (Von Neuman Morgenstern),

qui correspond donc au calcul d'un bénéfice actualisé probabilisé :  $\sum_{t=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{(1 + \delta)^t} \cdot E(X_t) \right] \geq 0$ .

### 14.2.4 - Enchaînements entre variables risquées : présentation simplifiée

Le terme  $\text{cov}(u'(C_t); X_t)$  de l'équation précédente quantifie la corrélation entre la richesse C (représentée par la consommation finale des ménages ou le PIB par la suite) et les effets X du projet.

Dans le calcul du bénéfice net actualisé (BNA) d'un projet de transports, cette corrélation apparaît à la fois pour les coûts du projet, mais surtout pour ces effets affectant la demande de transports, et ce, à plusieurs étapes du calcul, comme le montre le graphique simplifié ci-dessous.



Sur le graphique ci-dessus, sont représentés :

- en vert les paramètres ne dépendant a priori pas du PIB et/ou des prix "mondiaux" ;
- en jaune les paramètres dépendant directement du PIB et/ou des prix "mondiaux" ;
- en orange les paramètres dépendant indirectement du PIB et/ou des prix "mondiaux".

Les effets des variations du PIB sur les gains du projet apparaissent en particulier à différentes étapes du calcul des gains et la relation entre gains et PIB est donc plus ou moins directe.

Les différentes variables conduisant au calcul du BNA sont liées entre elles de différentes façons aux différentes étapes du projet. Ainsi, lors de l'affectation, l'influence du PIB sur les variations de trafics est fonction des autres variables de l'affectation, et notamment des caractéristiques des itinéraires, d'où l'importance d'avoir pour le calcul de la corrélation des gains du projet au PIB une approche spécifique à chaque projet.

#### 14.2.5 - Retour sur le critère de choix : espérance ou regret ?

Les paragraphes précédents se situent dans le cadre théorique de Von Neumann Morgenstern, qui conduit à retenir l'espérance de l'utilité comme critère de décision face au risque. Certaines approches retiennent des critères différents. On peut schématiquement présenter ces approches comme des approches du « regret » : l'idée est de minimiser le risque qu'une décision soit dommageable ou regrettable. Ces théories sont fondées sur des travaux en psychologie qui tendent à montrer que les agents souhaitent avant tout éviter une situation détériorée par leur décision. Ces théories peuvent rejoindre l'intuition selon laquelle un décideur veut éviter un projet qui soit un « échec », supposant que l'échec se mesure par un apport négatif à la collectivité.

Ces critères de la famille des « regrets » peuvent être illustrés simplement par la probabilité que le bénéfice net actualisé du projet soit négatif, ce qui s'exprime alors de la façon suivante, en reprenant les notations ci-dessus :

$$p\left[(u(C + X)) < (u(C))\right],$$

ce qui équivaut, sous les hypothèses précédentes, à :

$$p\left\{ \left[ \sum_{t=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{(1 + \delta)^t} \cdot X_t \right] \right] < 0 \right\}.$$

Ce critère de décision s'illustre, de façon simplifiée, par le fait que la probabilité du « regret » est inférieure à une probabilité de référence du décideur. Le paramètre important pour qualifier les comportements du décideur devient donc cette probabilité de référence, qui est une autre représentation de l'aversion pour le risque.

On note cependant que la forme réduite de ce critère :

$$p\left\{ \left[ \sum_{t=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{(1 + \delta)^t} \cdot X_t \right] \right] < 0 \right\}$$

requiert simplement de probabiliser le bénéfice net actualisé.

### 14.3 - Probabilisation des risques : paramètres aléatoires, lois de probabilité

#### Variables économiques déterminantes

L'évaluation socio-économique d'un projet de transport dépend des principaux paramètres suivants :

- La croissance du PIB : l'évolution du contexte macro-économique et notamment le taux de croissance du PIB est le facteur le plus important qui conditionne l'évolution de la demande de transport dans les modèles de prévision de trafic principalement pour les déplacements à longue distance.
- Les coûts d'investissement et d'exploitation : il est difficile d'estimer avec précision le coût exact du projet d'infrastructure, et on observe souvent un biais optimiste.
- Le trafic : les affectations sur le réseau dépendent essentiellement du modèle utilisé mais aussi des scénarios de croissance économique. L'incertitude sur la composante trafic peut provenir des incertitudes liées au recueil de données mais aussi au modèle qui se base sur des observations et comportements passés pour prévoir les comportements futurs et au modélisateur, par exemple lors du calage du modèle.

- Le coût de l'énergie : l'incertitude sur le coût de l'énergie se trouve principalement à trois niveaux :
  - Incertitude sur les prix des différents carburants
  - Incertitudes sur la constitution du parc automobile
  - Incertitudes sur les fonctions de consommation de carburant
- L'évolution relative des prix du mode concerné et des modes concurrents
- Les accidents : les taux d'accidents prévus suivant le type de route présentent une incertitude.
- Les valeurs tutélaires, dont les recommandations sont la plupart du temps assorties de précautions d'usage, d'intervalles de confiance ou de tests de sensibilité (en plus de l'effet des paramètres macro-économiques sur leurs taux de croissance).

### Détermination des formes de lois de probabilité

Une fois identifiés les paramètres de l'évaluation porteurs de risques, il s'agit de déterminer les distributions de probabilité sous-jacentes des risques probabilisables.

Cette étape constitue un point délicat de l'évaluation, dans la mesure où elle se heurte à la disponibilité d'observations d'un nombre suffisant de réalisations de l'aléa dont on souhaite estimer la loi de probabilité. En l'absence de telles estimations, on en est souvent réduit à utiliser des lois de distribution simples dérivées de l'estimation de "fourchettes", soit par des lois uniformes, soit par des lois en "triangle", soit par des lois normales.

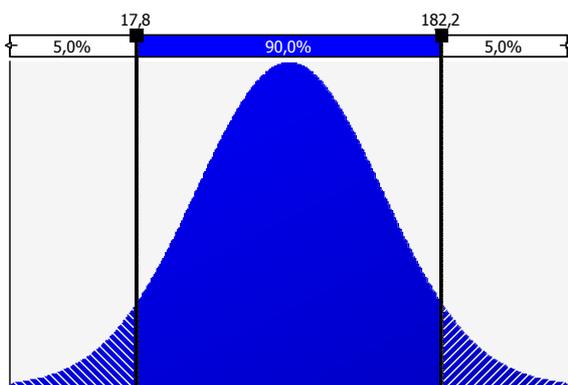


Figure 1 : exemple de loi normale

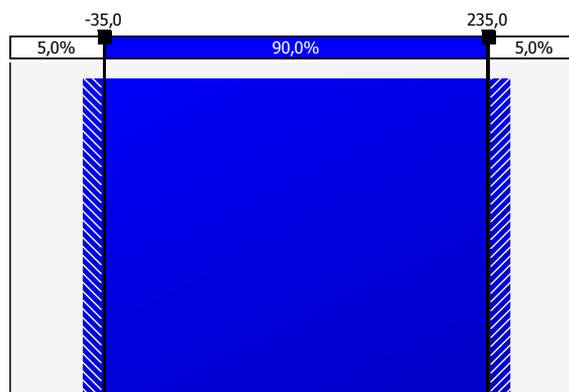


Figure 2 : exemple de loi uniforme

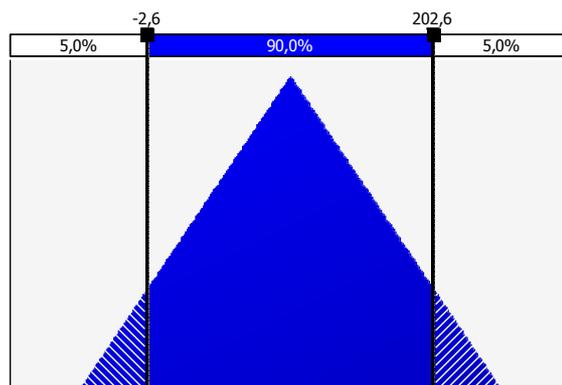


Figure 3 : exemple de loi "triangle"

### Méthodes numériques de probabilisation : aperçu

Une fois choisies ou déterminées les lois de distribution des variables affectant principalement les coûts et impacts du projet, on peut simuler numériquement ces lois à partir de techniques dites de Monte-Carlo. Ces techniques consistent à simuler numériquement un grand nombre de fois un événement aléatoire suivant une loi de probabilité de forme donnée. On peut alors calculer pour chaque tirage, l'indicateur (ici, l'utilité du projet), tenant compte des enchaînements décrits ci-dessus. On peut ensuite exploiter les résultats de manière statistique en calculant la distribution de probabilité de l'indicateur auquel on s'intéresse (ici, l'utilité du projet), tenant

compte des différentes distributions de probabilité des variables et de leurs corrélations. A partir de cette distribution, on peut calculer les indicateurs (espérance, variance-covariance) nécessaires au calcul de l'espérance de l'utilité.

On peut noter qu'en théorie, tout tirage aléatoire donne lieu au calcul intégral du bilan coût-avantage socio-économique actualisé, dans toutes ses composantes (valeurs de référence, coûts, demande agrégée, affectation des trafics, etc...), ce qui peut conduire à multiplier par plusieurs milliers les temps de calculs, parfois déjà significatifs pour la modélisation des trafics.

Cette méthode permet de décrire et quantifier le risque. Les graphiques issus des méthodes de Monte Carlo permettent ainsi de visualiser les distributions des bénéfices nets actualisés en fonction des variables que l'on aura souhaité probabiliser. On peut appliquer a priori cette méthode à tous les risques dès lors que l'on a défini les lois de probabilité des variables concernées. Il convient cependant de bien définir en amont les variables dont on souhaite voir l'impact sur les résultats de rentabilité du projet considéré. Ce type d'analyse permet notamment d'obtenir des informations telles que la probabilité que la rentabilité du projet passe en dessous d'un certain seuil.

### 14.3.1 - Calculs d'équivalents certains avec des simulations de Monte-Carlo

A partir de simulations de Monte-Carlo, on peut calculer le bénéfice actualisé équivalent certain d'un projet. En effet, les simulations donnent les distributions des différents outputs du modèle et permettent ainsi d'appliquer la formule au BNA équivalent certain, qui est égal à 
$$\sum_{t=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{(1+\delta)^t} \cdot u'(E(C_t)) \left( E(X_t) - \gamma \frac{\text{cov}(C_t; X_t)}{E(C_t)} \right) \right].$$

Pour le calculer, on suppose de plus que :

$$u'(C_t) = \left( \frac{C_t}{C_0} \right)^\gamma \quad \text{et que l'espérance de l'utilité peut s'exprimer comme une fonction croissante avec le temps :}$$

$$E(C_t) = C_0 \cdot (1 + \mu)^t$$

Le bénéfice actualisé équivalent certain est alors égal à :

$$\sum_{t=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{(1+a)^t} \cdot (1 + \mu)^{-\gamma} \cdot \left( E(X_t) - \gamma \frac{\text{cov}(C_t; X_t)}{E(X_t)} \right) \right]$$

Par la suite, on peut déterminer un « taux d'actualisation équivalent »  $a'$ , qui serait le taux d'actualisation à appliquer à une séquence de coûts-avantages sans risques, pour retrouver la valeur du bilan coûts-avantage actualisé équivalent certain. Pour déterminer ce taux d'actualisation équivalent, on résout l'équation suivante en prenant une durée de vie économique de 50 ans :

$$\sum_{t=0}^{50} \frac{1}{(1+a)^t} \cdot (1 + \mu)^{-\gamma} \cdot E(X_t - \Pi_t) = \sum_{t=0}^{50} \frac{1}{(1+a')^t} \cdot E(X_t)$$

### 14.3.2 - Tests de cohérence au travers d'une formulation analytique

Cette section explore une approche analytique simplifiée permettant d'évaluer à partir de plusieurs paramètres, les termes du bilan coûts-avantages, puis de calculer un taux d'actualisation « équivalent ». Ce dernier est défini comme précédemment, comme le taux d'actualisation qui égalise l'espérance actualisée de l'utilité des effets du projet et le bilan coût-avantage actualisé calculé au sens classique sans prise en compte du risque.

L'approche analytique est développée en deux temps : tout d'abord, c'est l'espérance actualisée du bilan coût-avantage du projet qui est formulée de façon analytique ; ensuite, c'est la modélisation de trafic et le calcul du surplus eux-mêmes qui sont présentés de façon analytique.

S'agissant de l'espérance actualisée du bilan, on peut trouver une formulation analytique très sommaire, où le lien entre le bilan du projet et le PIB se présente de façon intuitive par un lien (appelé ci-après « élasticité » et noté  $\varepsilon$ ) entre leurs valeurs moyennes et leurs variances respectives. Cette formulation sommaire est tributaire de la connaissance de ces élasticités. On fait alors une hypothèse dans laquelle l'espérance du PIB est supposée croître avec un taux annuel  $\mu$ , soit :  $E(C_t) = C_0 e^{\mu t}$ . On suppose également que l'espérance des effets du projet peut s'exprimer comme une valeur croissante au cours du temps, liée à l'espérance de la richesse de la façon suivante :

$$E(X_t) = X_0 e^{\varepsilon \mu t} = X_0 \left( \frac{E(C_t)}{C_0} \right)^\varepsilon$$
 . On peut alors définir le taux d'actualisation équivalent  $\alpha'$  à partir de la formule :

$$\sum_{t=t_0}^{\infty} [e^{-\alpha' t} E(X_t)] = X_0 \sum_{t=t_0}^{\infty} e^{(-\alpha' + \varepsilon \mu) t} = X_0 \frac{e^{(-\alpha' + \varepsilon \mu) t_0}}{1 - e^{-\alpha' + \varepsilon \mu}}$$

En faisant une hypothèse sur la forme de la distribution de probabilité du PIB (mouvement brownien géométrique), on trouve ensuite une formulation analytique plus poussée. Elle montre ainsi que, si le bilan du projet est lié au PIB à **travers une élasticité constante** et si **le flux de richesse collective suit un mouvement brownien géométrique**, alors les paramètres à considérer pour calculer le taux « équivalent » se réduisent à cette élasticité et au taux de croissance et à la volatilité du PIB. La part du risque dans le taux « équivalent » peut alors être identifiée en fonction de la volatilité du PIB et de l'élasticité du projet.

Notons que l'élasticité des gains du projet au PIB n'est a priori pas constante car le poids des avantages dans le bilan net actualisé d'un projet varie au cours du temps, et les élasticités des avantages au PIB sont différentes selon les avantages.

**Encadré : modèles analytiques à élasticité constante  $\beta$ .**

On peut construire différents modèles de taux équivalents basés sur une hypothèse d'évolution des avantages du projet et du PIB selon des mouvements browniens géométriques corrélés. On choisit de présenter ci-dessous les formules avec l'élasticité constante  $\beta$ .

**Modèle M1** : développement limité à l'ordre 1 de  $u'(C_t)$  pour le calcul de  $E(u'(C_t))$

$$\alpha'_{(1)} = \delta + \gamma \mu_C + \frac{1}{2} \gamma \sigma_C^2 + \gamma \beta \sigma_C^2 \frac{\delta + (\gamma - \beta) \mu_C + \frac{1}{2} (\gamma - \beta^2) \sigma_C^2}{\delta + (\gamma - \beta) \mu_C + \frac{1}{2} (\gamma - \beta^2 - 2\gamma\beta - 2\beta) \sigma_C^2}$$

**Modèle M2** : développement limité à l'ordre 3 de  $u'(C_t)$  pour le calcul de  $E(u'(C_t))$

$$\alpha'_{(2)} = \beta \mu_C + \frac{1}{2} \beta^2 \sigma_C^2 + \frac{2}{\delta + (\gamma - \beta) \mu_C + \frac{1}{2} (\gamma - \beta^2) \sigma_C^2} + \frac{\gamma(\gamma + 1)^2}{\delta + (\gamma - \beta) \mu_C + \frac{1}{2} (\gamma - \beta^2 - 2) \sigma_C^2} + \frac{\gamma(\gamma - 1)(\gamma + 2)}{\delta + (\gamma - \beta) \mu_C + \frac{1}{2} (\gamma - \beta^2 - 2\beta) \sigma_C^2} - \frac{\gamma^2(\gamma + 1)}{\delta + (\gamma - \beta) \mu_C + \frac{1}{2} (\gamma - \beta^2 - 2\beta - 2) \sigma_C^2}$$

**Modèle M3** : expression exacte de  $E(u'(C_t))$  (mais toujours le terme en  $E(X_t) - \gamma \text{cov}(X_t, C_t) / E(C_t)$ )

$$\alpha'_{(3)} = \delta + \gamma\mu_C - \frac{1}{2}\gamma^2\sigma_C^2 + \gamma\beta\sigma_C^2 \frac{\delta + (\gamma - \beta)\mu_C - \frac{1}{2}(\gamma^2 + \beta^2)\sigma_C^2}{\delta + (\gamma - \beta)\mu_C - \frac{1}{2}(\gamma^2 + \beta^2 + 2\gamma\beta + 2\beta)\sigma_C^2}$$

Dans le cas présent, la forme choisie des lois de probabilité des flux permet de s'affranchir de la linéarisation de  $u'(C_t)$  autour de  $E(C_t)$  ( qui conduit à l'apparition du facteur  $\gamma$ ), classiquement consentie pour exprimer le BNA en environnement incertain. On peut simplement écrire ici la formule exacte  $BNA = \sum_{t=t_0}^{\infty} [e^{-\delta t} E(X_t u'(C_t))]$

et calculer  $E(X_t u'(C_t)) = E(X_t) E(u'(C_t) | X_t) = E(X_t) \phi^{-\gamma\mu_C \sigma_C t} = E(X_t) \phi^{-\left(\gamma\mu_C - \frac{1}{2}\gamma^2\sigma_C^2 + \gamma\beta\sigma_C^2\right)}$

Le taux équivalent alors obtenu forme un 4<sup>ème</sup> modèle.

**Modèle M4** : expression exacte du BNA

$$\alpha'_{(4)} = \delta + \gamma\mu_C - \frac{1}{2}\gamma^2\sigma_C^2 + \gamma\beta\sigma_C^2$$

Ce taux équivalent se décompose en quatre termes dont les trois premiers ont été commentés dans l'article « Comment intégrer le risque dans le calcul socio-économique » [Gollier 2005] :

$\delta$  : préférence pure pour le présent

$\gamma\mu_C$  : effet richesse (la décroissance de l'utilité marginale et l'augmentation supposée de la richesse  $\mu_C > 0$  tendent à faire privilégier un gain immédiat par rapport à un gain à venir)

$-1/2\gamma^2\sigma_C^2$  : effet précaution (la convexité de l'utilité marginale est telle que l'augmentation de l'incertitude sur la consommation future accroît la valeur d'un gain futur)

$\gamma\beta\sigma_C^2$  : effet du projet (qui augmente le taux d'actualisation pour un projet pro-cyclique i.e.  $\beta > 0$  et qui le diminue dans le cas contraire)

Les expressions obtenues dans les quatre modèles précédents méritent quelques commentaires. Tout d'abord, la formule M4 obtenue à partir des hypothèses spécifiques d'évolution des flux montre que l'effet du risque attaché au projet est a priori du même ordre de grandeur que l'effet précaution, à savoir proportionnel à  $\sigma_C^2$ .

Dans l'hypothèse où l'écart-type  $\sigma_C$  du taux de croissance du PIB est du même ordre de grandeur que sa moyenne, il apparaît immédiatement que l'effet précaution et l'effet du risque sont d'un ordre de grandeur inférieur aux termes classiques de préférence pure pour le présent et d'effet richesse.

De plus, si l'élasticité  $\beta$  vaut  $\gamma/2$  alors ces deux termes se compensent. Plus généralement, si  $\beta > \gamma/2$  alors l'incertitude sur le PIB tend à augmenter légèrement le taux équivalent tandis que si  $\beta < \gamma/2$  alors l'incertitude sur le PIB tend à diminuer légèrement le taux équivalent.

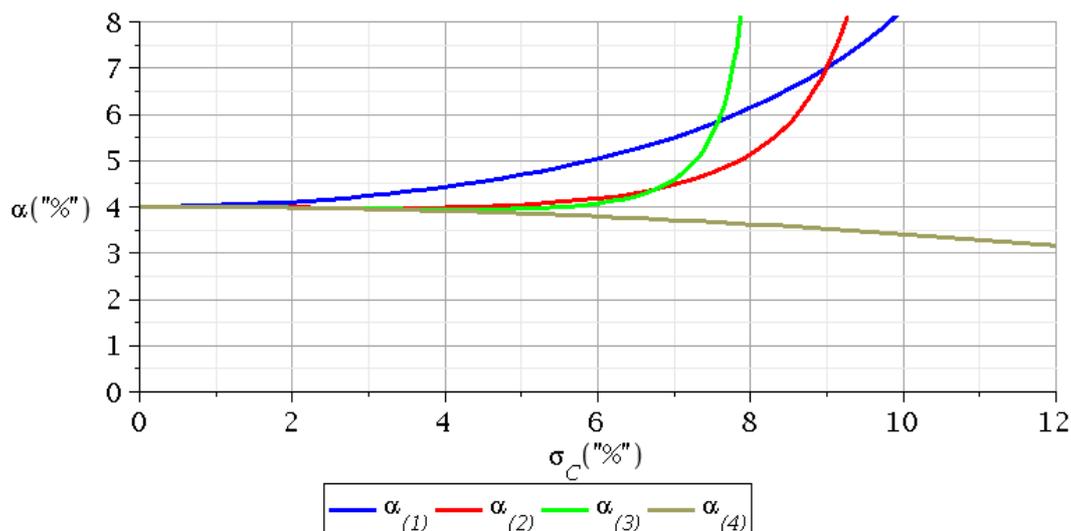


Figure 4 : taux équivalents en fonction de la dispersion du taux du PIB ( $\delta=1\%$ ,  $\gamma=2$ ,  $\mu_C=1.5\%$ ,  $\beta=0.7$ )

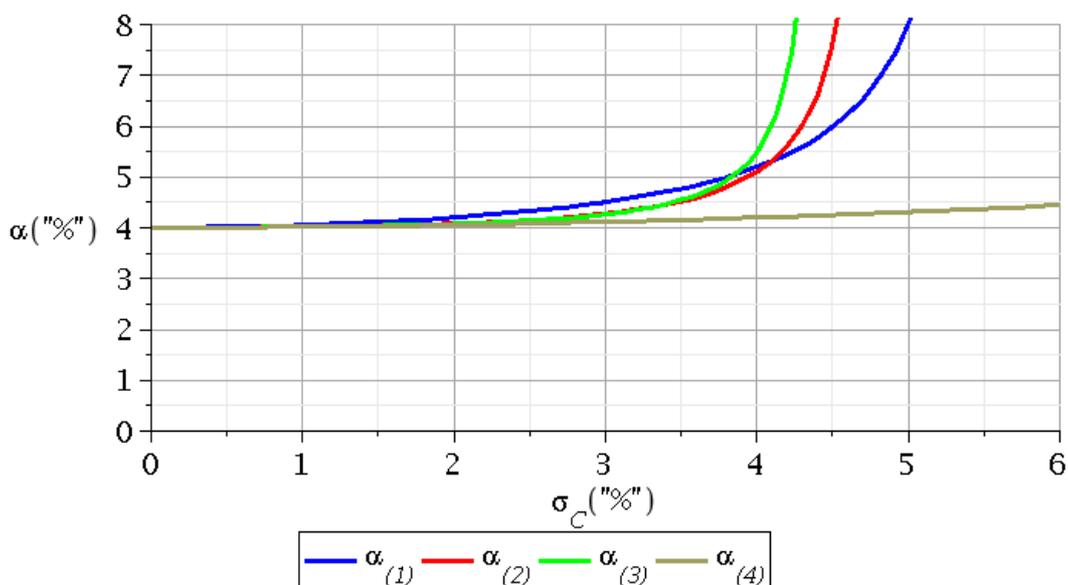


Figure 5 : taux équivalents en fonction de la dispersion du taux du PIB ( $\delta=1\%$ ,  $\gamma=2$ ,  $\mu_C=1.5\%$ ,  $\beta=1.6$ )

L'élasticité d'un projet de transport apparaît déterminante pour le calcul de l'effet « risque » dans le calcul du bilan actualisé. Ceci est particulièrement vrai si l'on est amené à retenir des formulations analytiques simplifiées avec des développements limités, car, dans ce cas, le taux d'actualisation équivalent calculé peut diverger pour des valeurs de variances du PIB  $\sigma_C^2$  de l'ordre de 4% (ce qui représente cependant déjà un risque très élevé).

### 14.3.3 - Résultats quantitatifs

Les tableaux suivants comparent « taux d'actualisation équivalents » calculés d'une part directement par des simulations numériques de Monte Carlo sur un projet simplifié de déviation, d'autre part par l'application de certaines formules analytiques simplifiées ci-dessus.

Les deux formulations analytiques retenues sont les suivantes :

**Modèle M1** : développement limité à l'ordre 1 de  $u'(C_t)$  pour le calcul de  $E(u'(C_t))$

$$\alpha'_{(1)} = \delta + \gamma\mu_C + \frac{1}{2}\gamma\sigma_C^2 + \gamma\beta\sigma_C^2 \frac{\delta + (\gamma - \beta)\mu_C + \frac{1}{2}(\gamma - \beta^2)\sigma_C^2}{\delta + (\gamma - \beta)\mu_C + \frac{1}{2}(\gamma - \beta^2 - 2\gamma\beta - 2\beta)\sigma_C^2}$$

**Modèle M4** : expression exacte du bénéfice net (hypothèse de mouvement brownien géométrique)

$$\alpha'_{(4)} = \delta + \gamma\mu_C - \frac{1}{2}\gamma^2\sigma_C^2 + \gamma\beta\sigma_C^2$$

Les tests de cohérence ont été effectués sur un projet de déviation, avec les hypothèses suivantes :

Taux d'actualisation pur	$\delta =$	1,0%
Elasticité des avantages par rapport au PIB (déduite du modèle)	$\beta =$	0,645
Ecart-type de la croissance du PIB	$\sigma =$	1.5%
Moyenne du taux de croissance du PIB	$\mu =$	1,5%

Aversion relative pour le risque	$\gamma =$	1	1,5	2
	$\delta + \gamma * \mu =$	2,5 %	3,25 %	4 %
Taux d'actualisation équivalent par calcul analytique	$a' = (\text{Modèle M1})$	2,53%	3,29%	4,05%
	$a' = (\text{Modèle M4})$	2,50%	3,25%	3,98%
<i>Par tirage Monte Carlo</i>	$a' = (\text{Monte Carlo})$	2,60%	3,40%	4,20%

Sur le cas testé, les résultats obtenus par l'approche analytique par les élasticités sont cohérents avec ceux obtenus directement par le modèle avec les simulations de Monte-Carlo. Les résultats des simulations numériques sont un peu plus élevés, ce qui est notamment dû au fait qu'ils intègrent une source de risque supplémentaires, au travers des effets des variations de prix du carburant sur les gains, dont l'élasticité sur le bilan du projet via le PIB n'apparaît pas. De plus, les élasticités ne sont pas constantes lors de l'application directe de simulations de Monte-Carlo.

L'approche analytique et les simulations de Monte Carlo confirment que le risque est négligeable sur le projet testé ici : le taux d'actualisation équivalent ne s'écarte que de quelques dixièmes de points du taux d'actualisation hors risque projet ( $\delta + \gamma * \mu$  dans le tableau ci-dessus). En reprenant des hypothèses cohérentes avec celles du rapport Lebègue ( $\delta=1\%$ ,  $\gamma=2$  et  $\mu=1.5\%$ ), on trouve des taux d'actualisation équivalents très proches de 4%.

## 14.4 - Elasticité du bilan d'un projet aux paramètres macro-économiques : approche analytique

Pour approfondir la question de l'élasticité du projet au PIB, la section ci-dessous propose une formulation analytique simplifiée du modèle de trafic et de calcul de surplus du projet, ce qui permet de « faire varier » les caractéristiques du projet, de façon calculable, ce que ne permet pas, pour un projet de transport, la lourdeur de l'approche de Monte Carlo.

### Présentation du projet « stylisé »

Le projet « stylisé » comporte une situation de référence caractérisée, schématiquement, par deux itinéraires (qui pourraient également être des modes de transports), caractérisés par des niveaux de services comparables, sur lesquels se répartissent un trafic total. L'affectation entre les modes se fait selon le rapport des coûts généralisés, en appliquant une Loi d'Abraham.

Le projet « stylisé » se caractérise par une amélioration du service (réduction des temps de parcours) sur un des itinéraires, accompagnée d'une variation des coûts externes, et du prix d'un coût de production du service de transports plus élevé, partiellement compensée par un surcroît de prix pour l'utilisateur. Ceci peut être assimilé à une mise à caractéristiques autoroutières d'un des deux itinéraires de la situation de référence.

Le bilan coûts-avantages d'un projet de transport « stylisé » est formulé de façon analytique, ce qui permet de calculer l'élasticité du bilan coûts-avantages au PIB et de faire varier les paramètres de l'évaluation et les caractéristiques du projet, tel qu'évoqué ci-dessus.

### Jeu de variantes sur les élasticités des paramètres de l'évaluation aux paramètres macroéconomique

On fait alors varier en premier lieu les élasticités des paramètres au PIB, pour ce « projet 0 » :

Un jeu d'élasticités dans lesquelles les paramètres de prix seraient positivement corrélés au PIB (idée de tension sur les prix en cas de croissance plus élevée et/ou de consentement à payer plus élevé en cas de hausse de revenus) conduit à une élasticité du bilan du projet plus faible :

Elasticités données	
Valeur du temps	0,7
<b>Péage</b>	<b>0,2</b>
<b>Entretien véhicules + carburant</b>	<b>0,2</b>
Demande de trafic	1,1
Externalités	1
<b>Coûts d'usage de l'infrastructure</b>	<b>0,2</b>
« Projet 0 » : élasticité composite résultante	
<b>Elasticité du projet</b>	<b>0,20</b>

Une élasticité du trafic au PIB plus faible conduit également à une élasticité du bilan du projet au PIB plus faible :

Elasticités données	
Valeur du temps	0,7
Péage	0,0
Entretien véhicule + carburant	0,0
<b>Demande de trafic</b>	<b>0,7</b>
Externalités	1
Coûts d'usage de l'infrastructure	0,0
« Projet 0 » : élasticité composite résultante	
<b>Elasticité du projet</b>	<b>0,44</b>

### Jeu de variantes sur les paramètres d'évaluation

Le tableau suivant présente les élasticités du projet au PIB, avec des valeurs différentes des principaux paramètres d'évaluation : valeur du temps, paramètre de la loi d'affectation (loi d'Abraham), valeur des coûts externes.

Elasticité composite du bilan du projet	
Valeurs des paramètres	
<b>Projet « V0 », valeurs « IC »</b>	<b>0,84</b>
Valeur du temps : -10 %	0,61
Valeur du temps : +10 %	1,10
Coefficient de la Loi d'affectation (Abraham) : 5 (au lieu de 10)	0,20
Coefficient de la Loi d'affectation (Abraham) : 20 (au lieu de 10)	1,57
Coûts externes unitaires : + 50 %	1,02
Coûts externes unitaires : - 50 %	0,60
Coûts d'usage des véhicules : + 20%	0,75
Coûts d'usage des véhicules : - 20%	0,94

### Jeu de variantes sur la « typologie du projet ».

Le modèle de projet « stylisé » peut également être utilisé pour tester la sensibilité de l'élasticité au PIB, en faisant varier les caractéristiques du projet.

On utilise, à titre illustratif, les « typologies » suivantes :

<b>Elasticité composite du bilan du projet</b>	
Type de projet	
<b>Projet « V0 »</b>	<b>0,84</b>
Projet plus coûteux : + 10% sur les coûts	0,32
Projet non autoroutier : passage de la vitesse de 70 km/h à 90 km/h ; péage = 0	0,21
Projet de type « gestion de trafic » sur route congestionnée : passage de 50 km/h à 70 km/h	0,76
Projet d'amélioration de la qualité de service sur un itinéraire de niveau de service inférieur à son concurrent : + 2 % sur le coût généralisé de l'itinéraire avant projet	0,41
Projet d'amélioration de la qualité de service sur un itinéraire de niveau de service supérieur à son concurrent : - 2 % sur le coût généralisé de l'itinéraire avant projet	1,13

Les simulations précédentes suggèrent que la sensibilité de l'élasticité du bilan du projet au PIB varie fortement à la fois selon les paramètres de l'évaluation et du calcul socio-économique, et selon les caractéristiques du projet.

Ceci conforte l'idée selon laquelle il est illusoire de pouvoir déterminer, par une forme de « projet de transport représentatif », une prime de risque unique caractéristique du secteur des transports, pour prendre en compte le risque. Dit autrement, ces simulations rappellent bien que tout projet de transport est spécifique et mérite une analyse de risque spécifique.

## 14.5 - Points de vigilance et limites d'utilisation

En se limitant à la question des risques (probabilisables) affectant les conditions d'évaluation du projet, on a appliqué ici le cadre de la décision publique en situation de risque dit « cadre de Von Neuman Morgenstern », qui se fonde sur la maximisation de l'espérance de l'utilité collective.

La prise en compte du risque est spécifique au projet considéré ce qui conforte l'idée de ne plus faire porter au taux d'actualisation la prise en compte indifférenciée des risques. La description stylisée de différents projets de transports montre en particulier que l'élasticité du bilan d'un projet aux variables macro-économiques, est très variable en fonction des caractéristiques du projet, de sa situation de référence, de ses modes concurrents, etc.

Les résultats sont également sensibles à l'aversion pour le risque (qui pose des problèmes aigus de mesure, notamment pour tenir compte des effets de mutualisation des risques entre agents, qui n'ont pas été abordés dans cette partie).

L'évaluation d'une espérance d'utilité d'un projet par des méthodes de type Monte Carlo suppose, schématiquement, de conduire une évaluation de ce projet pour chaque occurrence des aléas des paramètres affectant les effets du projet, ce qui est réalisable sur un modèle très simple de projet. Dans la réalité, ceci peut se révéler très coûteux en temps de modélisation.

Face aux difficultés liées à la multiplication des variantes de tirages aléatoires des paramètres affectant le projet, on peut être tenté de rechercher des formulations analytiques du lien entre ces paramètres (tels que le PIB ou la valeur du temps par exemple) et les termes du bilan coûts-avantages. Une telle approche analytique est possible. Mais il faut garder à l'esprit que les élasticités seront très spécifiques au projet, comme le soulignent les tests effectués avec un modèle stylisé de projet.

Ceci suggère que, dans l'évaluation d'un projet concret, ces élasticités nécessitent d'être évaluées numériquement assez finement. Les spécificités des projets de transports et le développement de la modélisation à quatre étapes, qui plus est sur des réseaux maillés, rend sans doute inatteignable de résumer des projets, même des projets-types en une relation analytique simple entre les paramètres et les termes du bilan coûts-avantages, telle que celle qui a été utilisée à titre pédagogique dans cette partie. Calculer les élasticités en faisant tourner le modèle de trafic avec quelques scénarios macro-économiques (dans le prolongement des recommandations et pratiques actuelles) permet d'éviter la multiplication des simulations de Monte-Carlo, mais se fait au détriment de la précision des élasticités.

L'utilisation des méthodes présentées dans cette partie suppose probablement d'approfondir d'abord la connaissance des lois de probabilité des principales variables macro-économiques, et notamment du PIB, mais aussi des prix des énergies ou des variables socio-démographiques, implicitement traitées de même façon que le PIB dans cette étude.

La question des sources d'incertitude spécifiques aux modèles de trafic / de surplus utilisés, indépendamment de l'incertitude sur les paramètres macroéconomiques reste également à traiter. Il convient en effet de distinguer les paramètres dont la connaissance des lois de probabilité relève d'une compétence spécifique à l'évaluateur en charge du projet de transports, et ceux qui relèvent d'approches plus génériques, au premier rang desquels figurent variables macroéconomiques (PIB, prix du pétrole).

## 14.6 - En pratique...

Toute évaluation de projet repose sur des estimations, qui sont entachées d'incertitude : cette incertitude porte sur les coûts, la demande, les impacts environnementaux, la valeur monétaire de certains impacts, les modèles utilisés, etc... ; mais également des aléas peuvent affecter le fonctionnement du système de transports une fois qu'il est en place, voire pendant sa phase de construction : aléas naturels, industriels, actes malveillants. Ceci est d'autant plus vrai que la période d'évaluation est longue, ce qui est le cas des projets de transports. Il importe de tenir compte de cette incertitude dans l'évaluation du projet, et notamment dans le calcul socio-économique du bénéfice actualisé.

Pour ce faire, il convient d'adopter une démarche pragmatique et proportionnée. Cette démarche comporte cinq principales étapes de difficulté croissante :

1. l'identification qualitative des risques, i.e. des sources d'aléas et des mécanismes par lesquels des composantes du bénéfice actualisé sont affectées ;
2. la hiérarchisation et le tri des variables identifiées comme sources d'aléas, en séparant celles dont l'évaluateur peut lui-même réduire l'ampleur (en collectant davantage d'informations ou en fiabilisant ses modèles par exemple) ;
3. une première quantification des principaux risques, sous forme de scénarii représentant des valeurs extrêmes mais probables des principales variables sources d'aléa ; cette quantification donne lieu au re-calcul du bénéfice actualisé avec les jeux de valeurs extrêmes retenues dans ces scénarii, dans la situation de conjonction respectivement la plus défavorable et la plus favorable des valeurs extrêmes, en tenant compte qualitativement des corrélations entre ces variables sources d'aléas ;
4. une deuxième quantification, à partir de lois de probabilités attachées à ces variables sources d'aléas ; cette probabilisation permet alors le calcul d'un bénéfice actualisé probabilisé (on recourt alors à des simulations dites « de Monte Carlo » qui reviennent à tirer au hasard un grand nombre de valeurs suivant une loi de probabilité déterminée) ; cette fonction de distribution du bénéfice actualisé permet notamment de calculer la probabilité que le bénéfice actualisé soit négatif ;
5. le calcul d'un « bénéfice actualisé équivalent-certain » : cette notion tient compte de l'aversion pour le risque du décideur public et calcule le bénéfice actualisé théorique fondé sur des variables supposées non risquées, mais diminué d'une « prime de risque » reflétant le coût que le décideur public est prêt à consentir pour que le bénéfice actualisé soit certain (i.e. non risqué) ; on peut également déduire de cet équivalent-certain un « taux d'actualisation avec prime de risque spécifique », i.e. le taux d'actualisation théorique qui, pour ce projet, rendrait égal le bénéfice actualisé théorique fondé sur des variables supposées non risquées avec le « bénéfice actualisé équivalent-certain » (calculé, lui, avec le taux d'actualisation en vigueur).

Compte-tenu de la complexité théorique sous-jacente à ces notions, du besoin de disposer de lois de probabilité de référence pour certaines variables (macroéconomiques ou valeurs tutélaires), et, dans certains cas, de la lourdeur des calculs de probabilisation du bénéfice actualisé, cette approche ne pourra à court terme qu'être partiellement mise en œuvre. A ce stade, il est possible d'atteindre au moins la troisième étape, c'est à dire l'approche par scénarii. Afin de pouvoir appliquer la quatrième étape, pour des projets importants, il faudrait faire appel à des lois de probabilité, dont les plus importantes portent sur les déterminants macro-économiques.

De plus, les temps de calcul, si des simulations de Monte-Carlo sont effectuées, peuvent rapidement être longs, une simulation pouvant durer de l'ordre d'une heure.

## Références réglementaires et bibliographiques

- Le calcul du risque dans les investissements publics, Rapport du groupe de travail présidé par Christian Gollier, Centre d'analyse stratégique, 2011
- Le calcul du risque dans les investissements publics, La note de synthèse n°233, Centre d'analyse stratégique, 2011
- La décision publique face à l'incertitude. Clarifier les règles, améliorer les outils, Comité de la prévention et de la précaution, mars 2010
- Actualisation : prise en compte du temps dans un environnement risqué, Christian Gollier
- Le prix du temps et la décision publique, Commissariat général du Plan, LEBEGUE D., 2005
- Comment intégrer le risque dans le calcul socio-économique, GOLLIER C, 2005
- L'évaluation des risques dans les projets publics, article publié dans la revue Economie publique n°10, KAST R. et LAPIED A, 2002
- La prise en compte du risque dans l'évaluation des politiques de développement durable, Conseil économique pour le développement durable, 2010
- Prise en compte du risque dans le calcul économique, SETRA, 2012

# Glossaire

Cette partie définit les principales notions qui interviennent dans les calculs socio-économique et financier afin de faciliter la compréhension de ces calculs et des concepts.

- **Actualisation** voir parties Taux d'actualisation : utilisation et Prise en compte du risque dans le calcul économique

La valeur du taux d'actualisation représente la plus ou moins grande préférence que l'on a pour le présent par rapport au futur.

Le taux d'actualisation permet de comparer entre elles des valeurs économiques qui s'échelonnent dans le temps, en ramenant une valeur future à une valeur actuelle. Ces valeurs sont comparées à des dates identiques, appelée année d'actualisation. Le taux d'actualisation s'applique à des valeurs constantes, c'est-à-dire ne subissant pas d'inflation.

La notion d'actualisation est distincte des notions d'inflation, d'indexation qui consiste à transformer des euros d'une année donnée en euros d'une autre année en utilisant de manière ascendante ou descendante un index (exemple index TP01) et distincte également du taux d'intérêt bancaire.

- **Approche coûts/avantages** voir parties Décomposition du bilan coûts-avantages et bilan par acteur et Bilan coût avantages collectif actualisé et indicateurs complémentaires

L'analyse coûts/avantages (ACA), ou coûts/bénéfices (ACB), consiste à mettre en balance les effets bénéfiques et néfastes d'une action, à l'aide d'une échelle de mesure monétaire commune. Cette approche est couramment utilisée par la puissance publique, en tant qu'outil d'aide à la décision. Elle permet de présenter une évaluation des effets d'un projet d'infrastructure (ou d'une mise en place d'une nouvelle politique) et de déterminer si ce projet est acceptable d'un point de vue économique et/ou sociale (opportunité du projet ou de la politique) et dans quelle mesure (rentabilité du projet ou de la politique).

Dans le secteur des transports, l'analyse coûts/avantages consiste à sommer l'ensemble des avantages et des coûts monétaires (ou monétarisés) induits par un projet ou une nouvelle politique, sur la base d'une unité monétaire homogène (euros constant) :

- gains de temps pour les usagers (monétarisés à l'aide de la valeur tutélaire du temps) ;
- variation d'impôts et de taxes pour l'Etat ;
- réductions éventuelles d'émissions de gaz à effet ou de polluants locaux pour la collectivité (monétarisés via les valeurs tutélares accordées respectivement au carbone et à la pollution atmosphérique) ;
- ...

- **Approche coûts/efficacité** voir parties Décomposition du bilan coûts-avantages et bilan par acteur et Bilan coût avantages collectif actualisé et indicateurs complémentaires

L'analyse coûts/efficacité (ACE) consiste à identifier l'efficacité d'une action, grâce à un objectif préalablement fixé, par rapport au coût de sa mise en œuvre. Cette approche permet de déterminer le coût social minimum (qualifié de valeur optimale, du point de vue économique) à attribuer à cette action pour atteindre l'objectif préétabli.

L'analyse coûts/efficacité est utilisée notamment pour déterminer la valeur de la tonne de carbone (valorisation de l'effet de serre), à partir des objectifs nationaux ou internationaux de réduction des émissions de GES : il s'agit du coût des efforts à consentir pour réduire les émissions au niveau fixé à l'échelle nationale ou internationale (isolation des bâtiments, construction de véhicules moins émetteurs, ...), à la condition que ces coûts soient inférieurs au coût des dommages occasionnés par ces émissions (recherche du coût social minimum).

- **Avantage** *voire parties* Décomposition du bilan coûts-avantages et bilan par acteur et Bilan coût avantages collectif actualisé et indicateurs complémentaires

Un avantage correspond à un coût (s'il est négatif) ou à un gain (s'il est positif) engendré par un projet d'infrastructure ou une nouvelle politique de transport. Il est possible de parler d'avantage d'une année : il s'agit de la somme des coûts et des gains engendrés par le projet à une année donnée.

- **Avantage net global** *voir parties* L'analyse coûts-avantages : concepts et contexte d'utilisation, Décomposition du bilan coûts-avantages et bilan par acteur et Bilan coût avantages collectif actualisé et indicateurs complémentaires

L'avantage net global correspond à la différence entre la somme actualisée des avantages des différents agents concernés par le projet (usagers, puissance publique, collectivité et éventuellement concessionnaire) et la somme actualisée des dépenses d'entretien et d'exploitation.

- **Bénéfice actualisé** *voir parties* Décomposition du bilan coûts-avantages et bilan par acteur *et* Bilan coût avantages collectif actualisé et indicateurs complémentaires

Le bénéfice actualisé correspond à la différence entre l'avantage net global et le coût d'investissement actualisé. Il permet d'apprécier l'intérêt intrinsèque d'un projet. Cet indicateur conduit à retenir les projets pour lesquels le bénéfice actualisé est positif. Il s'agit du critère de base pour le choix de projet résultant de l'évaluation socio-économique.

- **Bénéfice actualisé par euro investi (B/I)** *voir partie* Bilan coût avantages collectif actualisé et indicateurs complémentaires

Le bénéfice actualisé par euro investi correspond au rapport entre le bénéfice actualisé et le coût d'investissement actualisé. Il permet de classer des variantes d'un projet du point de vue de leur intérêt socio-économique pour la collectivité, en tenant compte de la contrainte de financement.

- **Consommation finale des ménages par tête** : *voir partie* Prise en compte du risque dans le calcul économique

La consommation finale des ménages (CFM) est la somme des dépenses de consommation de l'ensemble des ménages. Elle comprend notamment la part des dépenses de santé, d'éducation, de logement, restant à leur charge, après remboursements éventuels. La consommation finale des ménages par tête (CFMPT) est le ratio de la CFM sur le nombre d'habitants.

- **Contrainte budgétaire** *voir parties* Coût d'opportunité des fonds publics , Décomposition du bilan coûts-avantages et bilan par acteur *et* Bilan coût avantages collectif actualisé et indicateurs complémentaires

La réalisation de tous les projets dont la rentabilité socio-économique est supérieure au taux d'actualisation fixé par le Commissariat Général du Plan peut entraîner des besoins de financements publics supérieurs aux ressources disponibles. Pour tenir compte de cette contrainte budgétaire, il faut déterminer des priorités parmi les projets en les classant selon le critère du bénéfice actualisé par euro public dépensé. Cette notion est à dissocier de celle du coût d'opportunité des fonds publics.

## • **Coût du financement de l'ouvrage**

Il tient compte des frais d'émission des emprunts et des intérêts intercalaires sur les montants empruntés pendant la phase de construction qui majorent à due concurrence le coût de construction. Ce dernier comprendra, le cas échéant, les investissements complémentaires réalisés pendant la durée de la concession (ICAS), il prendra également en compte les dépenses étalées dans le temps et correspondant à une réalisation progressive des chaussées.

## • **Coût d'entretien et d'exploitation du scénario d'aménagement**

C'est la somme actualisée des coûts d'entretien et d'exploitation (de toute nature) hors taxes récupérables sur la durée de vie du projet.

## • **Coût global**

C'est la somme actualisée du coût d'investissement et du coût d'entretien et d'exploitation, exprimés hors taxes. Il permet, par exemple, d'apprécier la pertinence d'une option de construction progressive des chaussées, compte tenu d'un étalement différent dans le temps de dépenses concourant à un même objet.

## • **Coût de circulation**

Il s'agit de la somme des dépenses monétaires et non monétaires engagées par l'utilisateur à l'occasion d'un déplacement. Ces dépenses comprennent le coût du temps, d'inconfort, les dépenses de fonctionnement des véhicules (entretien courant, pneumatiques, lubrifiants, dépréciation, carburant) et éventuellement les péages.

## • **Coût d'investissement**

C'est la somme actualisée, selon un échelonnement prévisible, des dépenses TTC en matière d'études, d'acquisitions foncières et de travaux, y compris ceux de renouvellement des chaussées et ceux des éventuels aménagements complémentaires ultérieurs.

## • **Coût d'opportunité des fonds publics** voir partie Coût d'opportunité des fonds publics

Lorsque les avantages procurés par les investissements publics ne peuvent être rémunérés par des recettes, ils bénéficient généralement de subventions publiques, ressources dont le prélèvement par l'impôt est coûteux du point de vue de l'efficacité socio-économique. Le coût d'opportunité des fonds publics reflète la distorsion induite par un prélèvement sur l'économie via une fiscalité distorsive.

## • **Date optimale de mise en service** voir partie Bilan coût avantages collectif actualisé et indicateurs complémentaires

La date optimale de mise en service est la date pour laquelle **le bénéfice actualisé à une année fixée est maximal**. Pour déterminer cette date, on compare les bénéfices actualisés calculés avec différentes années de mise en service. Pour les comparaisons, tous les calculs doivent être effectués à une même année d'actualisation.

## • **Elasticité**

L'élasticité est le phénomène résultant d'une sensibilité de la demande à l'évolution des conditions de l'offre. Il évalue la propension du niveau de demande à s'ajuster en fonction de l'offre. L'élasticité se mesure par rapport à une composante de l'offre.

L'élasticité (par exemple ci-dessous l'élasticité du volume de trafic au coût de circulation), est égale au pourcentage de modification de la demande par rapport au pourcentage de modification de l'offre. Elle se calcule de la manière suivante :

$$e = \frac{\% \Delta V}{\% \Delta C} = \frac{\frac{V_2 - V_1}{V_1}}{\frac{C_2 - C_1}{C_1}}$$

- **Externalité** voir partie Externalités : principes de valorisation

Les coûts externes, ou externalités, correspondent aux effets de l'action d'un agent économique sur un autre agent qui n'est pas directement impliqué dans cette action, sans qu'il y ait nécessairement de compensation (pas de prise en compte par le marché). Ces externalités peuvent être des nuisances (resp. des gains) pour cet agent ; on parle d'*externalités négatives* (resp. *externalités positives*).

- **ICAS**

Investissements complémentaires sur autoroutes concédées en service. Les ICAS comprennent les dépenses liées aux échangeurs, aires de repos, de services, ... mais ne comprennent pas les élargissements.

- **IMMOS**

Dépenses de renouvellement des immobilisations des autoroutes concédées. **Elles sont incluses dans les grosses réparations.**

- **Inflation** voir partie Prise en compte du risque dans le calcul économique

L'inflation est la perte du pouvoir d'achat de la monnaie qui se traduit par une augmentation générale et durable des prix.

Elle est évaluée en utilisant comme déflateur d'indice des prix à la consommation (IPC).

- **Méthodes de préférences déclarées** voir partie Externalités : principes de valorisation

Les méthodes de préférences déclarées sont des méthodes de monétarisation basées sur des enquêtes par questionnaire auprès des individus. Ces questionnaires ont pour but de recueillir les déclarations des agents (choix entre diverses options hypothétiques) et d'en déduire le coût qu'ils accordent à certains effets induit par une externalité.

- **Méthodes de préférences révélées** voir partie Externalités : principes de valorisation

Les méthodes de préférences révélées sont des méthodes de monétarisation basées l'observation du comportement des individus. Ces comportements révèlent les préférences des individus, qui sont ensuite monétarisées par observation (directe ou indirecte) du prix de ces préférences sur les marchés.

- **Projet**

Le projet est défini comme étant le principe d'aménagement d'une liaison. Son évaluation porte sur la totalité de la liaison, comme le demande la Loi d'Orientation sur les Transports Intérieurs, même lorsque celle-ci est susceptible d'être réalisée par tranches fonctionnelles successives.

## • **Puissance Publique**

Ensemble des collectivités publiques (Etat, collectivités territoriales) qui perçoivent des recettes fiscales et qui supportent des dépenses.

## • **Résultat Brut d'Exploitation (RBE)**

Une section concédée génère des recettes de péages, le cas échéant complétées par les produits des sous-concessions, et supporte des charges liées à son exploitation et à son entretien. La différence entre les deux constitue le RBE (appelé Excédent Brut d'Exploitation lorsqu'il est positif) permettant le remboursement des emprunts souscrits pour financer l'ouvrage, le paiement de l'impôt sur les sociétés, la rémunération des actionnaires (lorsqu'ils ont contribué au financement).

## • **Risque** voir partie Prise en compte du risque dans le calcul économique

Toute évaluation de projet repose sur des estimations et il est fréquent que les avantages et les coûts de la réalisation d'une opération gagnent en précision avec les étapes successives d'instruction d'un projet. La dépense d'investissement elle-même n'est qu'une estimation réalisée au moment où est conduite l'évaluation. En outre, les valeurs retenues pour les paramètres d'évaluation du projet peuvent également être entachées d'incertitudes, alors que l'utilisation du bénéfice actualisé comme indicateur de choix nécessite d'évaluer les effets sur longue période, dans un environnement éventuellement contrasté (situation de référence). Dans toute évaluation, le projeteur être en mesure d'apprécier la robustesse des décisions prises et le risque qui leur est associé.

Trois grandes familles de risques et de facteurs corrélatifs peuvent avoir une incidence sur la rentabilité d'un projet, elles concernent :

- le taux d'actualisation qui constitue la référence générale pour l'évaluation de tous les projets publics. Ce taux doit refléter l'incidence de l'incertitude des taux de croissance économique futurs, pour ce faire le groupe de travail du Commissariat Général du Plan, qui a proposé de nouvelles valeurs du taux d'actualisation, a tenu compte de cet effet par une approche probabiliste qui a conduit à prévoir une décroissance du taux d'actualisation dans le temps pour rendre compte de la croissance corrélative de l'incertitude ;
- les risques économiques liés notamment à l'évolution de la consommation finale des ménages (par tête) et qui influencent la valorisation des avantages et des coûts du projet (temps, sécurité, effets externes, ...), donc sa rentabilité ;
- les risques liés à la mise en oeuvre de l'évaluation, ils peuvent résulter par exemple : de l'emploi de données insuffisamment fiables (enquêtes O-D, estimation trop sommaire du coût du projet, etc.), d'une modélisation insuffisante de la situation initiale ou de la situation de référence. A cet égard il a été constaté qu'une définition correcte de la situation de référence (Annexe 17) était un facteur important de réduction des erreurs d'évaluation et que les incertitudes se réduisaient dans le temps avec les étapes successives d'évaluation du projet.

Les impacts de ces facteurs sur la rentabilité des projets doivent être évalués à l'aide des outils présentés dans la partie Prise en compte du risque dans le calcul économique

## • **Option de référence** voir partie Option de référence, option de projet et scénario de référence

L'option de référence sert de base à la comparaison entre des projets répondant aux mêmes objectifs dans le même espace géographique : C'est la situation optimisée la plus probable en l'absence du scénario d'aménagement à l'horizon considéré. C'est rarement le statu quo. Elle est définie à la fois par un cadrage macroéconomique et par un état du réseau à l'horizon d'étude avec, si nécessaire, une prise de position explicite du responsable de l'étude. La situation de référence prend en compte :

- l'évolution du contexte économique (PIB, prix du transport routier et ferroviaire, prix des carburants...);
- l'évolution du contexte social (démographie, motorisation des ménages...);
- l'évolution du contexte des transports (infrastructures mises en service indépendamment du projet étudié, aménagements qui auraient été effectués en l'absence de projet).

- **Scénario de référence** voir partie Option de référence, option de projet et scénario de référence

Le scénario de référence est l'ensemble des variables exogènes au projet. Il représente donc le cadre dans lequel le projet est évalué, et il est donc par définition commun à l'option de référence et à l'option de projet. Le scénario de référence comporte donc les hypothèses sur l'évolution du PIB, de la population, du coût du carburant, etc.

- **Subvention équilibrant la concession**

C'est l'apport externe (de l'Etat et des autres collectivités publiques) annulant la VAN financière ; c'est également, ce qui est équivalent, l'apport permettant de rémunérer les composantes du financement à la charge du concessionnaire à hauteur d'objectifs de rentabilité conformes aux conditions prévalant pour un investissement présentant un niveau de risque similaire. La subvention réduit d'autant les financements du concessionnaire et se rapporte pour la commodité de lecture au coût de construction (et non à celui du financement).

- **Taux de rentabilité interne pour la collectivité** voir partie Bilan coût avantages collectif actualisé et indicateurs complémentaires

Le taux de rentabilité interne est la valeur du taux d'actualisation qui annule le bénéfice actualisé. Si cette valeur est supérieure au taux d'actualisation recommandé par le Commissariat Général du Plan, alors le scénario d'aménagement est intéressant pour la collectivité. Cet indicateur permet de mesurer le risque associé au scénario d'aménagement mais ne permet pas de classer des scénarios d'aménagements indépendants (ne s'excluant pas entre eux).

- **Taux de rentabilité interne financier**

Il s'agit du taux d'actualisation financier qui annule une chronique de dépenses et de résultats annuels. Dans le cas où les financements sont supposés assurés exclusivement par l'emprunt, il est égal au taux d'intérêt à long terme des emprunts utilisés dans les calculs d'actualisation (dans la pratique il doit être substantiellement supérieur à ce taux, compte tenu de l'importance des risques du concessionnaire). Un TRI peut également être calculé sur la seule part des financements incombant au concessionnaire (c'est-à-dire hors subvention du concédant) mais aussi sur les seuls apports en capitaux de ses actionnaires. Dans ce dernier cas le TRI est calculé sur la chronique des apports en capitaux et des dividendes les rémunérant.

- **Valeur Actuelle Nette (VAN) financière**

La Valeur Actuelle Nette financière est la différence entre la somme actualisée au taux financier pertinent du résultat brut d'exploitation et le coût du financement de l'ouvrage.

- **Valeur résiduelle** voir partie Durée de vie optimale et valeur résiduelle

La valeur résiduelle économique d'un projet de transport correspond à la somme actualisée des avantages nets procurés par le projet à la collectivité, au-delà de sa durée de vie économique

- **Valeurs tutélaires** voir parties Externalités : principes de valorisation et Coût généralisé

Il s'agit des valeurs pour lesquelles il n'existe pas de coût marchand : valeur du temps, de la vie humaine, de la pollution de l'air, de l'effet de serre, du bruit. Selon le rapport du Commissariat Général du Plan, *Transports : choix des investissements et coût des nuisances*, la Documentation Française, juin 2001, p19 : "on s'efforce de [les] fixer en analysant le comportement des gens (valeurs révélées) ou leurs réponses à des enquêtes (valeurs déclarées). Ces études conduisant à des ordres de grandeur ou à des fourchettes, mais pas à des valeurs précises, l'État intervient pour en normaliser les résultats et faire en sorte que tous les intéressés utilisent, jusqu'à nouvel ordre, la même valeur. Le dit État ne cherche donc pas à se placer au-dessus de ce que révèle l'étude des comportements et des opinions des gens, il normalise les résultats de ces analyses."

Cette valise pédagogique vise à présenter les principaux concepts sous-jacents au calcul socio-économique appliqué au secteur des transports, et à en présenter la formulation mathématique. Le présent document est organisé en trois parties :

- la première partie insiste sur le besoin de bien définir la situation de référence et la situation de projet : cette recommandation méthodologique n'est pas spécifique à l'application du calcul socio-économique, mais elle prend toute son importance dans la mesure où celui-ci vise à une quantification et une valorisation des impacts, qui est en général très liée à la situation de référence ;

- la deuxième partie présente l'analyse de la demande de transports dans le cadre plus général de l'analyse socio-économique, en introduisant notamment l'importance de la valeur du temps et des autres paramètres des choix des usagers (confort, fiabilité, prix et coûts), à la fois dans l'analyse de la demande, et dans celle du surplus collectif ;

- la troisième partie présente les différentes étapes et les principaux outils d'usage courant dans le calcul socioéconomique ; cette partie n'aborde pas les questions dont les développements méthodologiques sont encore embryonnaires ou controversés dans le secteur des transports, principalement quant aux effets sur l'accessibilité, l'emploi et l'inclusion sociale ; dans le même ordre d'idées, cette partie n'approfondit pas les questions pratiques liées à la monétarisation des effets externes (principalement environnementaux), mais se limite aux concepts généraux et génériques aux différents types d'impacts.

En résumé, ce guide vise à permettre au lecteur d'acquérir les concepts essentiels et de comprendre les méthodologies existantes du calcul économique, en les illustrant sur les projets de transport interurbain.

L'objectif est notamment que les chargés d'études puissent appliquer le calcul économique en étant conscients de ses limites mais aussi, de ses possibilités d'innovation. Ce document est entièrement subsidiaire aux documents de référence prescriptifs en matière d'évaluation au Ministère, auxquels il n'a aucune vocation à se substituer.

---

## Rédacteurs

Charlotte COUPE – Sétra –CSTM-DEOST

téléphone : 33 (0) 1 60 52 31 71

mél : [charlotte.coupe@developpement-durable.gouv.fr](mailto:charlotte.coupe@developpement-durable.gouv.fr)

Hélène LE MAÎTRE – Sétra –CSTM-DEOST

téléphone : 33 (0) 1 60 52 33 02

mél : [helene.le-maitre@developpement-durable.gouv.fr](mailto:helene.le-maitre@developpement-durable.gouv.fr)

**Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements**

110 avenue de Paris, 77171 SOURDUN France  
téléphone : 33 (0)1 60 52 31 31

Document consultable et téléchargeable sur les sites web du Sétra :

- Internet : <http://www.setra.developpement-durable.gouv.fr>
- Intranet (Réseau ministère) : <http://intra.setra.l2>

Ce document ne peut être vendu. La reproduction totale du document est libre de droits.  
En cas de reproduction partielle, l'accord préalable du Sétra devra être demandé.

© 2013 Sétra – Référence : 1301w – ISRN : EQ-SETRA-13-ED01-FR

Le Sétra appartient  
au Réseau Scientifique  
et Technique  
du MEDDE