

## **MODÈLES DE TRAFIC ET ÉVALUATION DES AVANTAGES DANS LE CALCUL ÉCONOMIQUE**

CLAUDE ABRAHAM

IGHPC

ALAIN BONNAFOUS

LAET

UNIVERSITÉ DE LYON

JEAN-BAPTISTE RAY

MOVI'CITÉ

### **1. INTRODUCTION**

L'estimation des bénéfices actualisés engendrés par la construction d'un nouvel ouvrage ou par la mise en service d'un nouveau mode de transport fait partie des calculs classiques d'évaluation socio-économique rendus obligatoires par de nombreux textes officiels<sup>1</sup>. Dans le vaste ensemble de création ou de destruction de valeur pris en compte pour cela, on sait que l'avantage qui pèse généralement le plus est celui dont bénéficient les usagers, c'est-à-dire leur surplus au sens de Jules DUPUIT (1844). Cet élément non marchand est mesuré en unité monétaire grâce à une intuition géniale de cet auteur, intuition qui est en somme fondatrice du calcul économique. Elle consiste à poser que l'utilité collective d'un ouvrage dont l'usage est gratuit peut être mesurée en termes monétaires en considérant ce que l'ensemble des usagers serait disposé à payer pour cet usage (à supposer donc que l'on

---

<sup>1</sup> En particulier les « instructions cadre » du ministère compétent qui sont régulièrement mises à jour depuis les années 60, la dernière datant du 16 juin 2014, et que plusieurs lois, à l'instar de la LOTI de 1982, ont rendu obligatoires.

puisse obtenir de chacun le montant exact du péage au-delà duquel il serait dissuadé d'utiliser l'ouvrage).

Ainsi, entre un état initial noté 0 de l'offre de transport et l'état final noté 1 qu'il s'agit d'évaluer, la variation de surplus des usagers, formalisée avec les écritures actuelles, s'écrit :

$$\Delta S = - \int_0^1 T(p) dp \quad (1)$$

$T$  étant la quantité de service de transport consommée en fonction du prix  $p$  (un prix qui est, dans les estimations contemporaines, un coût généralisé pour l'utilisateur incluant des éléments non monétaires comme le temps ou le confort). On retrouve ainsi très exactement les mêmes ingrédients que dans la préconisation de DUPUIT. La seule différence entre son énoncé et l'approche contemporaine consiste à établir ce résultat avec une formalisation mathématique et à l'intégrer dans la théorie du rendement social. Cette formalisation a permis à Jacques LESOURNE (1972), longtemps après l'article fondateur, d'apporter la démonstration mathématique du fait que cette variation de surplus des usagers est bien une composante de la variation d'utilité collective.

Pour Jules DUPUIT, on obtient ainsi la mesure complète de cette variation d'utilité collective en ajoutant à cette création de valeur au bénéfice des usagers l'autre création de valeur que sont les éventuelles recettes de l'ouvrage considéré (dans le cas où il fait l'objet d'un péage) et, bien entendu, en retranchant les destructions de valeur que sont les dépenses d'investissement et de fonctionnement. Nous savons que ces calculs coûts avantages n'ont cessé de se perfectionner et d'incorporer un nombre croissant d'effets externes à la sphère marchande, qui concernent principalement la sécurité et l'environnement. Il reste que dans le cadre des évaluations socio-économiques, le surplus des usagers représente en général la part la plus importante des avantages du projet évalué.

Il s'agit donc d'un élément qui va peser dans les évaluations qui sont réputées éclairer la décision d'investir. Plus précisément, si l'on se réfère aux textes récents (MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT, DES TRANSPORTS, DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE, DU TOURISME ET DE LA MER, 2004, m.à.j. 2005 ; MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, 2014), on peut observer que le ratio Valeur Actualisée Nette (VAN) par euro public dépensé prend de l'importance dans la hiérarchisation des projets, à l'image de ce qui se passe au plan international avec la notion de « *value for money* ». Ainsi, dans des projets pour lesquels le surplus de l'utilisateur pèse pour plus de la moitié de cette VAN (CHEVASSON, 2007), l'enjeu n'est pas dérisoire d'une évaluation pertinente de ce surplus.

L'objet de cet article est de montrer que cette évaluation peut être sensiblement infléchie selon la méthode retenue pour l'évaluation du surplus.

Les deux possibilités pour le calcul des avantages des usagers sont décrites dans la section 2, en précisant les avantages et les inconvénients de chacune de ces méthodes. La section 3 présente une application pour deux types de modèles utilisés par le Réseau Scientifique et Technique de l'État français (SETRA, 2010). La section 4 rappelle les conclusions de l'exemple utilisé et propose des recommandations pour l'évaluation des projets.

## 2. MÉTHODES D'ÉVALUATION DES SURPLUS ET MODÈLES DE TRAFIC

Les modalités de calcul des surplus, sont rappelées, en particulier, dans l'Instruction du Gouvernement du 16 juin 2014 relative à l'évaluation des projets de transport, complétée par la note technique de la DGITM relative à l'évaluation des projets de transport du 27 juin 2014. Quand, par exemple, on construit un nouvel ouvrage (route, voie ferrée) et qu'une partie du trafic qui empruntait l'itinéraire ancien est capturée par le nouveau, si le coût généralisé moyen sur l'ancien itinéraire était égal à  $C_1$  et qu'il devient sur le nouvel itinéraire  $C_2$  et si le trafic transféré est égal à  $T$ , le surplus des usagers est réputé égal à  $T.(C_2 - C_1)$ .

Lorsque l'amélioration de la qualité du service engendre un trafic supplémentaire  $\Delta T$ , le surplus ainsi engendré est généralement estimé égal à  $\Delta T.(C_1 - C_2)/2$ . En outre, si ce transfert d'une partie du trafic réduit les coûts généralisés sur l'itinéraire initial par décongestion, il en résulte un surplus supplémentaire pour les usagers ne changeant pas d'itinéraire.

Nous nous proposons de montrer que cette formulation classique des variations de surplus ne rend qu'imparfaitement compte de la réalité. Il nous faut pour cela distinguer deux méthodes d'estimation.

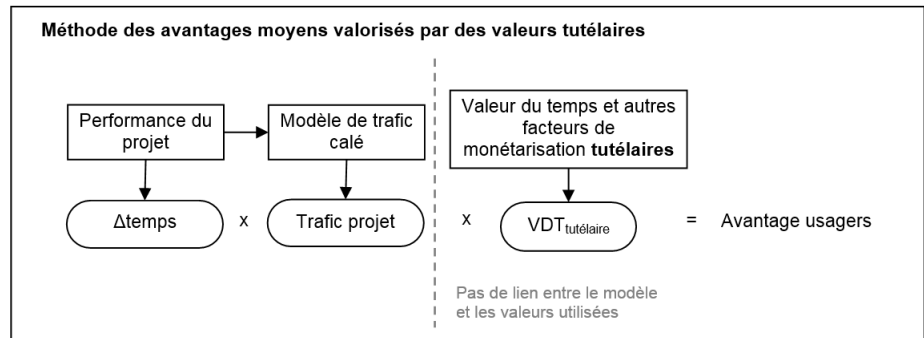
### 2.1. CALCUL DES AVANTAGES MOYENS

C'est la méthode préconisée dans l'« Instruction cadre relative aux modalités d'évaluation des grands projets d'infrastructure de transport » (DIRECTION GÉNÉRALE DES ROUTES, 2007). Dans celle-ci, le calcul socio-économique valorise avec des valeurs tutélaires (dont la définition est donnée plus loin) les avantages donnés par les modèles de transport. La Figure 1 récapitule schématiquement ce calcul.

Cette méthode a l'avantage de la simplicité, en particulier en ce qu'elle permet de comparer des projets entre eux sans préjuger qui utilisera l'infrastructure. Elle permet ainsi une identité de traitement entre tous les individus et tous les territoires. Elle a aussi l'avantage de ne pas dépendre de la méthode de modélisation choisie. Des travaux ont montré que plusieurs types de modèles avec plusieurs ensembles de paramètres peuvent aboutir aux mêmes résultats en termes de niveaux de trafic, mais avec des paramètres de calage différents, notamment en termes de valeur du temps (DE JONG et alii,

2007 ; JEANNIÈRE et alii, 2010). Le fait de séparer la valorisation des effets du processus de modélisation suggère donc une meilleure comparabilité des évaluations socio-économiques.

Figure 1 : Méthode des avantages moyens valorisés par des valeurs tutélaires



Cependant, cette méthode implique des différences entre la modélisation (et donc les comportements) et l'évaluation notamment en termes de poids relatifs des temps et des coûts. Elle déconnecte les résultats de la réelle valeur économique dégagée par un projet. Par exemple, un projet qui permet un gain de temps élevé pour un péage élevé sera utilisé par des individus à fort consentement à payer. Pourtant, le calcul de l'avantage moyen, s'il est fait sur la base des valeurs moyennes, qu'elles soient tutélaires ou issues du modèle de trafic, peut aboutir à un avantage des usagers négatif comme le montre l'application numérique suivante !

Supposons un gain de temps de 6 minutes pour un niveau de péage de 1,5 € et une valeur du temps tutélaire utilisée de 10 €/h. L'avantage  $A$  des usagers du projet est donné par la formulation suivante :

$$A = \text{trafic}_{\text{projet}} \cdot (\text{VDT} \cdot \Delta t_{\text{projet-référence}} + \Delta \text{coût}_{\text{projet-référence}})$$

$$A = \text{trafic}_{\text{projet}} \cdot (10 \cdot 6/60 + 0 - 1,5)$$

$$A = -0,5 \cdot \text{trafic}_{\text{projet}} < 0$$

On obtient ainsi un avantage négatif pour les usagers du projet. Pourtant, le modèle de trafic prévoit un trafic non nul sur le projet, ce qui signifie que certains usagers en tirent un avantage par rapport à l'itinéraire alternatif. Dans cette application numérique en effet, tous les usagers dont la valeur du temps individuelle est supérieure à 15 €/h retirent un avantage (positif) du projet. Le comportement des usagers révèle donc une « valeur » qui n'est pas celle qui est mesurée à partir des valeurs moyennes, qu'elles soient ou non tutélaires.

En outre, la même difficulté surgit si l'on traite avec une valeur tutélaire unique deux régions aux revenus contrastés : ce choix apparemment équi-

table induit une erreur dans la mesure des valeurs créées.

On doit cependant relativiser ce risque d'erreur. Les valeurs tutélaires sont tout de même définies « au plus près des préférences des individus ». Le rapport BOITEUX (2001) affirme ainsi :

*« On trouve dans les différents rapports du plan l'expression de « valeur tutélaire ». Mais alors que cette notion s'appliquait dans le passé à une valorisation que l'État, dans sa sagesse, promulguait pour le bien de ses administrés sans avoir nécessairement à épouser leur point de vue, il s'agit ici d'une valeur que les groupes de travail [des commissions BOITEUX] se sont efforcés de fixer en analysant le comportement des gens... on retrouve ici un problème très classique en économie publique sur la fonction d'utilité collective... les derniers travaux ont pris l'option, chaque fois que cela était possible, de fonder le processus de production de ces valeurs sur la base des observations des comportements pour faire en sorte que les valeurs de référence ne soient pas en totale déconnexion avec ce que révèlent les comportements des agents économiques ».*

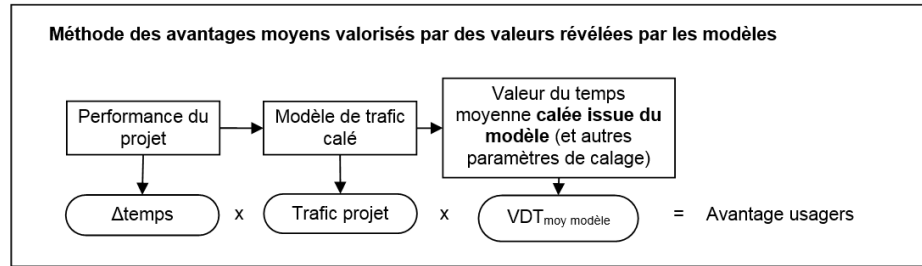
Ces éléments permettent de nuancer le premier des deux inconvénients exposés ci-dessus. C'est ainsi que les valeurs tutélaires sont généralement segmentées en fonction de la distance, du mode, ou du motif notamment. Le modélisateur a donc la possibilité de segmenter la demande pour faire correspondre au mieux les valeurs de monétarisation utilisées aux valeurs révélées par les comportements.

Par ailleurs, le problème reste entier de l'hypothèse de répartition optimale des revenus, sans laquelle les surplus d'usagers ne sont plus additifs. Le rapprochement des valeurs tutélaires et des valeurs révélées va naturellement favoriser des investissements utiles aux revenus les plus élevés. Mais cette question renvoie à la prise en compte de la redistribution, évoquée dans les travaux de BONNAFOUS et MASSON (2003) en ce qui concerne l'équité spatiale ou RAUX et alii (2007) en ce qui concerne les considérations d'équité verticale, horizontale et spatiale. Ces travaux plaident en faveur d'une certaine désagrégation, permettant une valorisation différenciée des avantages, et une meilleure identification des gagnants et des perdants.

En réponse à la faiblesse de la méthode précédente, les récentes circulaires préconisent de réaliser un test de sensibilité des résultats du calcul socio-économique en prenant les valeurs du temps issus du modèle et non les valeurs tutélaires. La Figure 2 synthétise ce test.

Cette méthode améliore la prise en compte des comportements dans le calcul des avantages par rapport à la méthode précédente. Cependant, si elle utilise des valeurs modèles moyennes, elle peut conduire aux mêmes erreurs que l'approche par valeurs tutélaires.

Figure 2 : Méthode des avantages moyens valorisés par des valeurs révélées par les modèles



En poursuivant l'exemple précédent, et en supposant que la valeur du temps moyenne révélée par le modèle est de 12 €/h, on obtient :

$$A = \text{trafic}_{\text{projet}} \cdot (\text{VDT} \cdot \Delta t_{\text{projet-référence}} + \Delta \text{coût}_{\text{projet-référence}})$$

$$A = \text{trafic}_{\text{projet}} \cdot (12 \cdot 6/60 + 0 - 1,5)$$

$$A = -0,3 \cdot \text{trafic}_{\text{projet}} < 0$$

Pourtant, le modèle de trafic prévoit un trafic non nul sur le projet (41 % pour un modèle « ABRAHAM » simple de compétition route-autoroute), ce qui signifie que des usagers en tirent un avantage. Dans cette application numérique en effet, tous les usagers dont la valeur du temps individuelle est supérieure à 15 €/h retirent un avantage positif du projet. En pratique, si l'on néglige les avantages des usagers de l'itinéraire concurrent et que l'on considère que la performance de celui-ci est équivalente entre la situation de référence et la situation de projet, dès que la part de marché de l'autoroute est inférieure à 50 %, l'avantage moyen est négatif. En effet, une part de marché de 50 % signifie que le coût généralisé du projet est égal au coût généralisé de la référence (pris égal au coût généralisé de l'itinéraire alternatif gratuit dans cet exemple simplifié). Les exemples de la Section 3, fondés sur un calcul plus complexe intégrant plusieurs itérations d'affectation montrent une valeur de part de marché de l'autoroute de l'ordre de 30 à 40 %.

Comme précisé plus haut, cette approche par les valeurs révélées est recommandée en tant que test de sensibilité dans l'instruction cadre dite « DE ROBIEN » mise à jour en 2007<sup>2</sup>:

*« Les calculs seront effectués avec des valeurs du temps normalisées, représentant une synthèse des valeurs de comportement résultant des meilleures études de trafic disponibles. Cette normalisation a pour but d'assurer une comparabilité des études de rentabilité des différents projets. Ces valeurs peuvent différer des valeurs du temps utilisées dans les modèles de trafic pour établir les prévisions des déplace-*

<sup>2</sup> Dans son Annexe I relative à la valorisation tutélaire des effets indirects ou non marchands.

*ments du projet évalué. On pourra, en variante, effectuer des calculs de rentabilité avec les valeurs du temps utilisées dans l'étude de trafic. »*

Cependant, il n'est pas fait mention de l'utilisation de ce test de sensibilité, ni de l'impact potentiel de ce calcul en fonction des projets. Enfin, il semble que cette suggestion concerne l'utilisation des valeurs du temps moyennes révélées par les modèles et non une utilisation de la distribution des avantages, méthode analysée dans la sous-section suivante.

Notons encore que la valorisation des avantages par la valeur du temps de chaque sous-segment de demande (les maintenus, les reportés du mode  $i$ , de l'itinéraire  $j$ , les induits) plutôt que par une valeur du temps moyenne de l'ensemble des usagers améliore grandement la cohérence entre modèle et calcul socio-économique. MEUNIER (2014) rappelle l'intérêt de cette approche tout en indiquant la difficulté de sa mise en œuvre dans certains cas.

Enfin, on peut noter que les méthodes qui utilisent les valeurs du temps issues des modèles rendent l'évaluation davantage dépendante du choix du modèle et de la qualité du calage de celui-ci (par rapport à l'utilisation de valeurs tutélaires). Elle limite donc la comparabilité des évaluations entre projets.

## 2.2. CALCUL DES AVANTAGES DISTRIBUÉS ISSUS DES MODÈLES

Les valeurs normatives ou révélées utilisées dans les méthodes précédentes sont censées représenter une utilité collective pour les gains de temps ou de confort. Pourtant, les choix sont fondés sur des fonctions d'utilité individuelles, qui varient fortement selon les individus et dans le temps : les estimations des termes de confort sont dispersées, les péages peuvent être, ou non, remboursés par les employeurs, les valeurs du temps dépendent du motif du déplacement et des revenus notamment. Les modèles de choix discret intègrent dans leur formulation cette dispersion des préférences. Ils intègrent également les écarts entre les valeurs réelles de certains paramètres, et les valeurs estimées par les usagers : par exemple, quand un usager choisit un itinéraire, il sait rarement quel temps il va mettre, et quel temps il aurait mis s'il avait fait un autre choix ; et même si ce n'est pas le cas, les temps de parcours, comme les vitesses, dépendent des usagers.

L'utilité est ainsi exprimée en une composante déterministe (observable et mesurable) et une composante aléatoire :

$$U_j^i = u_j^i + \varepsilon_j^i$$

où :

$U_j^i$  représente l'utilité pour l'individu  $i$  du choix de l'option  $j$

$u_j^i$  représente la composante déterministe (mesurable et observable)

de l'utilité. En l'absence de segmentation, cette composante est identique pour tous les usagers :  $u_j^i = u_j \forall i$

$\varepsilon_j^i$  représente la variable aléatoire, de moyenne nulle sur l'ensemble de la population.

Les individus vont, en cohérence avec la théorie néoclassique, choisir l'option qui maximise l'utilité qu'ils en retirent. Ainsi, si l'on considère pour simplifier un choix entre deux itinéraires, soit  $a_{2,1}^i$  l'avantage procuré par l'itinéraire 2 par rapport à l'itinéraire 1 pour l'individu  $i$ ,

$$a_{2,1}^i = u_2 - u_1 + \varepsilon_2^i - \varepsilon_1^i$$

L'individu  $i$  empruntera l'itinéraire 2 s'il lui procure un avantage par rapport à l'itinéraire 1, soit si  $a_{2,1}^i > 0$ . Cette condition s'écrit ainsi :

$$\varepsilon_2^i - \varepsilon_1^i > -(u_2 - u_1)$$

La variable  $\varepsilon_2^i - \varepsilon_1^i$  suit une distribution de probabilité de moyenne nulle. Posons  $x = \varepsilon_2^i - \varepsilon_1^i$ . La proportion de trafic sur l'itinéraire 2 par rapport à l'itinéraire 1 revient à estimer la probabilité  $P(x > -(u_2 - u_1))$ , c'est-à-dire estimer la probabilité que  $x$  soit supérieur à l'avantage moyen.

Il existe de nombreux modèles de choix discrets permettant de prévoir l'affectation du trafic entre itinéraires ou modes concurrents, fondés sur diverses hypothèses relatives à la nature du terme aléatoire  $\varepsilon_2 - \varepsilon_1$ . Les plus fréquemment utilisés sont :

1. le modèle « logit »,
2. le modèle « logit logarithmique », également appelé « loi d'ABRAHAM »,
3. le modèle dit « prix-temps »,
4. le modèle « probit ».

Nous ne traiterons pas d'autres formes de modèles, certains plus utilisés en zone urbaine (CERTU, 1998 ; BONNEL, 2004).

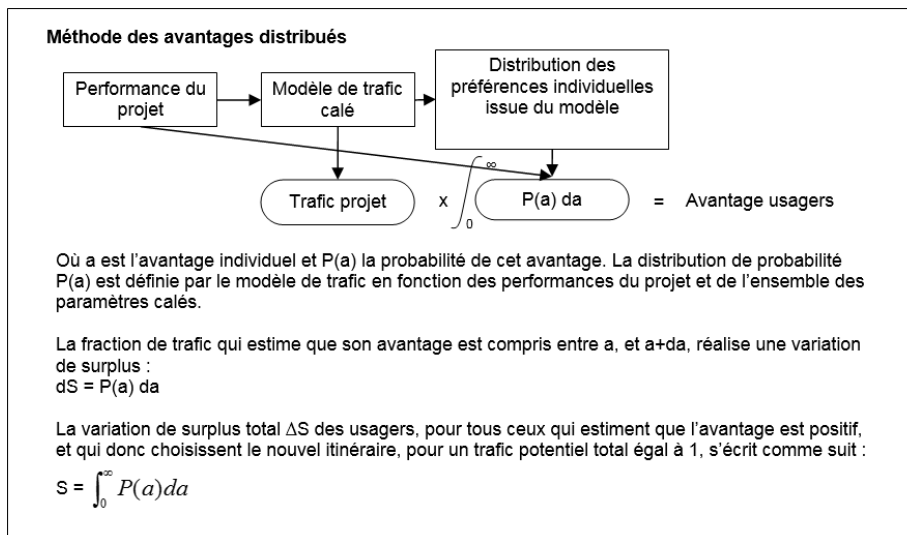
Comme précisé en introduction, nous nous focaliserons dans cet article sur les modèle logit logarithmiques et prix-temps, utilisés par le Réseau Scientifique et Technique de l'État en France pour l'évaluation des projets.

Il est intéressant de noter que la littérature traite largement du cas des modèles logit. SMALL et ROSEN (1981) ont explicité les conditions dans lesquelles le calcul économique pouvait être adapté au cas des modèles de choix discrets. Sous certaines conditions comme la constance de l'utilité marginale des revenus récapitulée notamment dans DE JONG et alii (2005) et BATES (2003), ou comme l'hypothèse d'indépendance des variables aléatoires (analysée notamment dans ZHAO et alii, 2008), le surplus peut être exprimé simplement comme la différence des logsum (démonstration rappelée dans



RAUX et alii, 2007). Bien que la théorie ait été connue dès la fin des années 70, les cas d'application concrète de cette méthode n'apparaissent qu'au début des années 2000 en Scandinavie, aux Pays Bas et aux États-Unis (pays dans lesquels existent des modèles nationaux basés sur des modèles de choix discret). Cette facilité de calcul a motivé récemment des travaux de recherche néerlandais et américains notamment qui envisagent de modifier leurs recommandations pour le calcul socio-économique pour prendre en compte l'estimation du surplus des usagers par la méthode des avantages distribués au travers du logsum. Nous verrons cependant que les résultats dépendent de la formulation des modèles, limitant les possibilités de comparaison entre projets.

Figure 3 : Méthode des avantages distribués



On peut noter dans cette méthode les trois avantages suivants. L'évaluation du surplus des usagers est directement liée à la distribution des utilités utilisée dans les modèles, garantissant une parfaite cohérence entre les avantages socio-économiques calculés et le comportement des usagers tel qu'il est modélisé. Dans le cadre des modèles de choix discret à utilité de type logit multinomiaux ou logit emboîtés, le calcul du surplus par cette méthode est simple (différences de logsum, donné comme résultat des modèles). Cette méthode permet de dépasser les limites des méthodes exposées précédemment, et notamment dans le cas de projets d'infrastructure à péage où l'avantage moyen normé peut être négatif.

Cependant, il convient de tenir compte de deux difficultés :

- Le niveau de surplus calculé est dépendant de la formulation des modèles (choix du type de modèle notamment), ce qui ne permet pas une bonne comparaison des projets entre eux lorsque ceux-ci ne proviennent pas d'un unique modèle (Cf. notamment DE JONG et alii,

2005). De même que pour la méthode précédente, si on applique deux modèles différents au même projet, on obtiendra des résultats différents.

- Le résultat du calcul est fortement dépendant de la forme de la courbe de distribution et notamment pour les valeurs élevées. Or les modèles sont généralement calés pour des valeurs intermédiaires d'utilité. Une incertitude importante peut donc exister pour ces « queues » de distribution, avec un impact non négligeable sur le calcul du surplus (Cf. plus loin sur les exemples d'application). MEUNIER (2014) identifie également ce risque et suggère même de tronquer les courbes de demande inverse dans le cas de nouveaux projets au prix pour l'utilisateur élevé.

On peut noter que cette méthode, est en parfaite adéquation avec la théorie économique et l'hypothèse de répartition optimale des revenus. Une variation élémentaire de revenu a la même valeur quel que soit l'individu considéré. Le surplus du projet au sens économique est ainsi mieux appréhendé que par les méthodes classiques (valorisation par une valeur moyenne) et la question de l'équité doit être traitée par ailleurs.

Nous verrons dans les exemples suivants que les méthodes classiques sous-évaluent les avantages lorsque le projet présente un coût d'usage élevé.

### 3. COMPARAISON DES MÉTHODES SUR UN EXEMPLE D'APPLICATION

#### 3.1. DÉFINITION DU CAS D'APPLICATION

Soit une relation origine-destination donnée entre deux points de choix A et B, un flux sur la relation de 18 000 véh/jour et une option de référence avec une route de capacité C. En option de projet, la route est doublée d'une autoroute à 2x2 voies de capacité 72 000 véh/jour et de vitesse à vide 130 km/h.

Les tests ont porté sur une famille de scénarios faisant varier trois variables : la longueur du projet (30 km, 60 km ou 110 km), la vitesse à vide sur autoroute (130 km/h, 110 km/h, 90 km/h) et la capacité de la route parallèle (20 000 veh/h, 24 000 veh/h ou 30 000 véh/h). La modification de la capacité de la route parallèle à demande constante permet de faire jouer le niveau de congestion du corridor considéré.

Le Tableau 1 récapitule le cas de figure utilisé dans les analyses qui suivent. Une généralisation sur l'ensemble des tests effectués en faisant varier longueur, vitesse et capacité est proposée juste avant la conclusion.

Un modèle de congestion est appliqué (30 itérations) intégrant des courbes Débit-vitesse pour autoroute et RN interurbaine afin de simuler de manière plus réaliste les gains de temps entre référence et projet.

Tableau 1 : Hypothèses du cas d'application

	Option de référence		Option de projet		unité
	route	route	autoroute		
Vitesse à vide	90	90	130		km/h
Tps parcours à vide	80	73	42		min
Distance	110	110	90		km
Coût essence	6.2	6.2	5.1		€TTC
Péage			12.6		€TTC
Coût monétaire total	6	6	18		€TTC
Gain de temps		7	38		min
Gains coût (monétaire)		-	11		€TTC

Les courbes débit-vitesse utilisées sont les suivantes :

$$sat = q / (q_{max} \cdot c)$$

$$sat_{critique} = 1$$

$$t_{chargé} = t_0 \cdot (1,1 - a \cdot sat) / (1,1 - sat) \text{ pour } sat < sat_{critique}$$

$$t_{chargé} = t_0 \cdot (1,1 - a) \cdot sat^2 / 0,1 \text{ pour } sat > sat_{critique}$$

Valeurs de a et c prises en compte :

- Autoroute : a= 0,9 et c=1,1

- Route alternative : a=0,65 et c=1,2 (en situation de référence comme en situation de projet).

Deux modèles sont appliqués pour l'estimation de la part de marché route/ autoroute : un modèle dit d'« ABRAHAM » et un modèle prix-temps. Ces deux modèles sont présentés ci-dessous.

La « Loi d'ABRAHAM », dite également « Logit logarithmique », a été développée dans les années 60 à la Direction des Routes. C'est une version approximative du modèle probit qui postule que les coûts généralisés sont distribués selon une loi normale. Il semble que la première formulation du modèle probit est due à ABRAHAM et COQUAND (1961) et qu'elle a été reformulée, et analysée de façon rigoureuse, par McFADDEN (1973) et BEN AKIVA (1973 ; 1985) entre autres.

La loi d'Abraham s'écrit :

$$\frac{T_2}{T_1 + T_2} = \frac{1}{1 + (C_2 / C_1)^k}$$

où :

$T_j$  est le trafic de l'itinéraire  $j$

$C_j$  le coût généralisé de l'itinéraire  $j$

$C_j = p_j + VDT \cdot t_j$ , avec  $p_j$  le prix du trajet et  $t_j$  le temps de parcours.

Dans le cas d'application, les paramètres pris en compte sont :

$$k=10$$

$$VDT=18,7 \text{ €/h.}$$

Le deuxième type de modèle utilisé ici est un modèle dit « prix-temps », dont les premières formulations sont dues à ABRAHAM et alii (1969). Dans ce type de modèle, le coût généralisé de l'itinéraire  $j$  pour l'individu  $i$  est de la forme :

$$C_j^i = p_j + VDT^i \cdot t_j$$

où :

$p_j$  est le prix du trajet (péage + essence)

$t_j$  le temps de parcours.

Dans ce modèle, les coûts généralisés individuels ne dépendent que des valeurs du temps qui sont distribuées. On admet en général que la distribution des Valeurs individuelles Du Temps (VDT) obéit, comme la distribution des revenus, à une loi « log-normale » (BONNEL, 2004).

Les avantages ou bénéfices individuels s'écrivent :

$$a^i = C_2^i - C_1^i = p_2 - p_1 + VDT^i \cdot (t_2 - t_1)$$

Il existe une valeur du temps, dite de basculement, au-delà de laquelle le bénéfice estimé devient positif :

$$VDT_b = \frac{p_2 - p_1}{t_1 - t_2}$$

Les individus qui retirent un avantage de l'itinéraire 2 par rapport à l'itinéraire 1 en situation de projet et qui se retrouvent sur l'infrastructure, sont les individus pour lesquels la valeur du temps individuelle est supérieure à  $VDT_b$ .

Dans le cas d'application, les valeurs prises en compte pour la distribution de la valeur du temps est  $VDT=18,25$ , avec un écart type de  $\ln(VDT)=0,48$ . Ces paramètres sont calés pour minimiser le carré des écarts entre loi d'ABRAHAM et modèle prix-temps sur la courbe part de marché =  $f(\text{tarif autoroute})$ .

Le trafic induit n'est pas intégré au calcul des avantages des exemples qui suivent. Le trafic induit est généralement limité à un ordre de 10 % de la demande dans le type de cas étudié lorsque le niveau de péage est modeste et bien moins lorsque le niveau de péage est élevé. Les avantages (demi-avantages) liés au trafic induit seraient ainsi clairement de second ordre. En outre, les incertitudes sur la réalité des trafics induits estimés sont très élevées.

### 3.2. MÉTHODOLOGIE DE CALCUL UTILISÉE

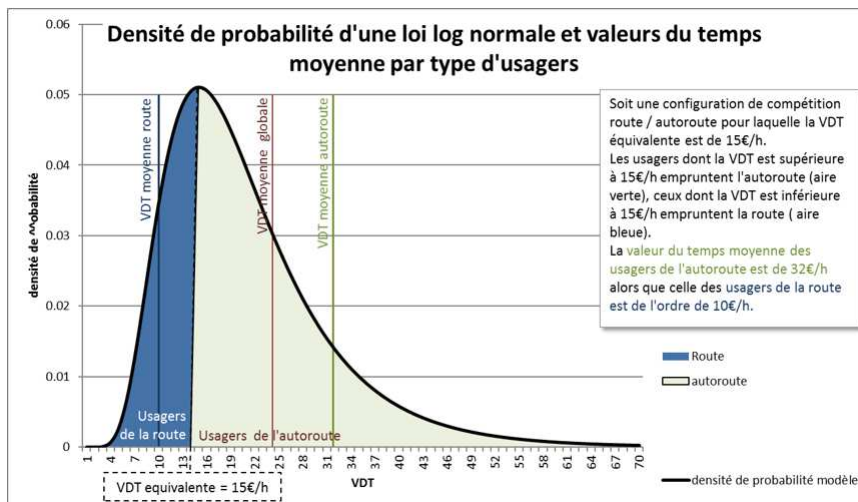
Les résultats donnés plus loin sont obtenus en comparant un calcul des avantages avec la méthode classique (méthode utilisant les valeurs du temps moyennes révélées par le modèle) et un calcul des avantages avec une méthode dite « des avantages distribués » qui reprend la distribution des avantages individuels déterminée par le modèle utilisé.

Notons que pour le calcul de la méthode classique, se pose la question de multiplier les gains de temps par la valeur moyenne des valeurs du temps ou par la médiane. On sait qu'une loi de distribution « log-normale » est caractérisée par deux paramètres qui sont la valeur moyenne et la valeur médiane de la variable étudiée. Dans les distributions classiques de valeur du temps, la médiane est approximativement égale à 70 % de la moyenne. Sur ce point, les rapports BOITEUX (1994 ; 2001) sont ambigus et n'indiquent pas, dans le cas des modèles prix-temps, si la valeur recommandée est la valeur moyenne ou la valeur médiane. Nous retenons ici l'utilisation de la valeur moyenne qui est plus cohérente avec le calcul des avantages distribués puisqu'à péage nul, la méthode des avantages distribués revient à calculer l'intégrale de la loi de distribution et donc la valeur moyenne.

**Pour la méthode prix temps**, la méthode « des avantages distribués » correspond à un calcul simple de détermination d'une valeur du temps moyenne pour les usagers de l'autoroute d'une part et de la route d'autre part. Le gain de temps est multiplié par cette valeur du temps moyenne par catégorie d'usagers.

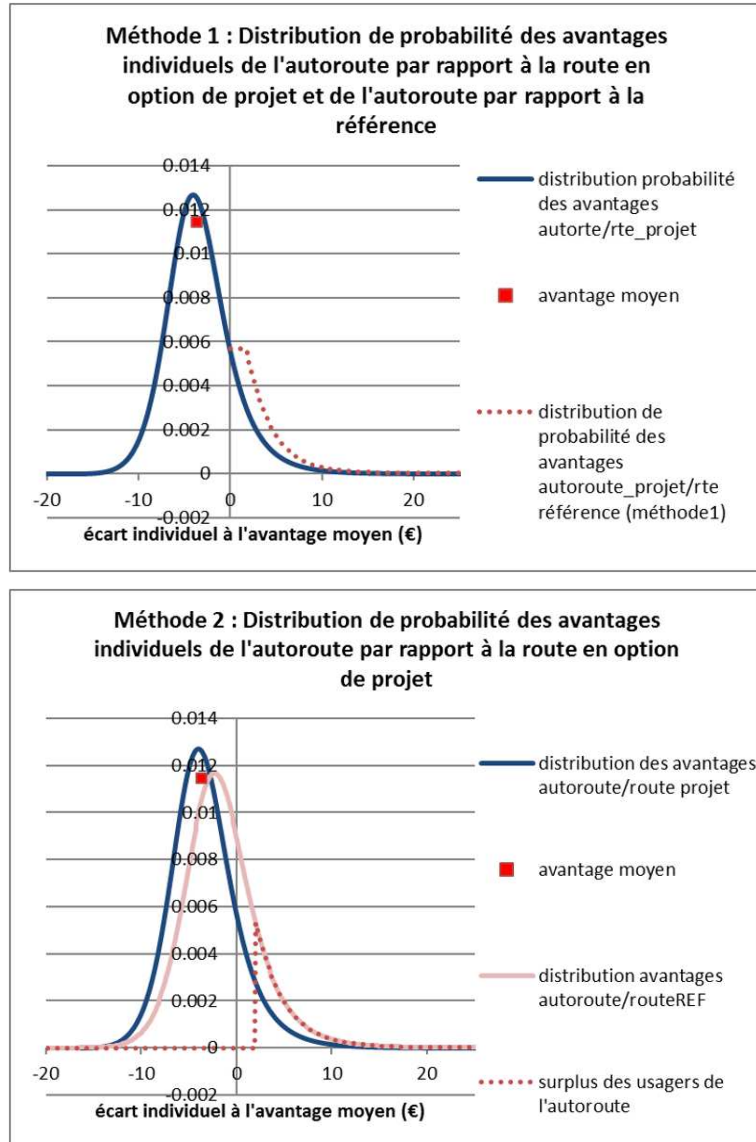
On constate (Figure 4) que la valeur du temps moyenne est fortement tirée par les valeurs du temps élevées de la queue de la distribution log-normale.

Figure 4 : Illustration de la valeur du temps différenciée entre les usagers de la route et les usagers de l'autoroute



Pour le modèle logit logarithmique (loi d'ABRAHAM), le calcul de la distribution des avantages de l'autoroute par rapport à la route en option de référence ne se formule pas aisément. En effet, la loi de distribution permet de déterminer une distribution des avantages de l'autoroute en option de projet par rapport à la route en option de projet. Or pour le calcul socio-économique, il est nécessaire de calculer les avantages de l'autoroute en option de projet par rapport à la route en option de référence. Deux méthodes ont été testées qui donnent des résultats très proches (Figure 5).

Figure 5 : Distribution de probabilité des avantages individuels de l'autoroute par rapport à la route



La première méthode adoptée consiste à décaler de  $B=C_1-C_{1,ref}$  la distribution des avantages autoroute/route<sub>projet</sub>. Les usagers de l'autoroute sont l'intégrale de la courbe pleine pour  $x > 0$ . Si on considère que la route en option de projet présente un avantage de  $B$  par rapport à la route en option de référence (non distribué car il s'agit de la même infrastructure, le même coût et des temps de parcours différents) et l'autoroute un avantage de  $x$  par rapport à la route en option de projet, on peut poser que l'avantage de l'autoroute par rapport à la route en option de référence est de  $B+x$  pour  $x > 0$ .

La deuxième méthode consiste à calculer une distribution fictive de compétition entre la route en option de référence et l'autoroute en option de projet (courbe pleine claire dans le deuxième graphique). On détermine  $X_0$  de manière à ce que l'intégrale de la courbe pleine foncée pour  $x > 0$  soit égale à l'intégrale de la courbe pleine claire pour  $x > X_0$ . L'avantage des usagers de l'autoroute en projet par rapport à la route en référence est donc la moyenne pondérée des avantages sur la courbe en pointillés.

Les deux méthodes donnent des résultats très similaires.

Les avantages des usagers de la route en option de projet peuvent être distribués (en considérant que les usagers restant sur la route ont une valeur du temps plus faible que ceux ayant choisi l'autoroute, la valeur du temps moyenne appliquée peut être calculée sur la sous-population des usagers de la route) ou non distribués (prise en compte de la valeur du temps moyenne sur l'ensemble de la population).

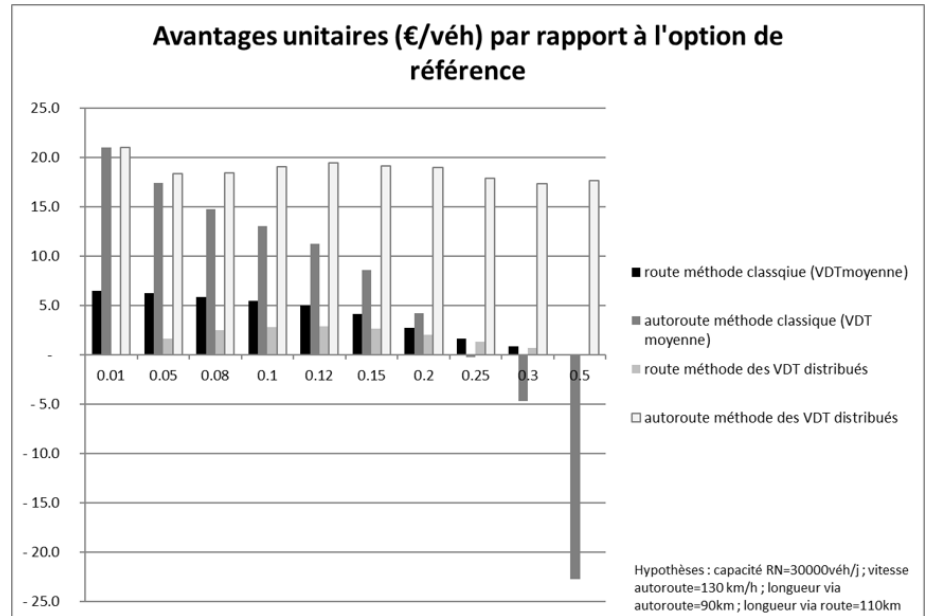
### 3.3. ANALYSE DES RÉSULTATS

#### **Avantages unitaires**

Les avantages unitaires des usagers de l'autoroute calculés avec la méthode « avantages distribués » sont systématiquement supérieurs ou égaux aux avantages calculés avec la méthode classique (Figure 6). En effet, les usagers empruntant l'autoroute sont ceux dont les valeurs du temps sont les plus importantes. En calculant une moyenne pondérée des avantages sur les usagers de l'autoroute, on obtient une valeur supérieure à celle trouvée en prenant la valeur du temps moyenne de l'ensemble de la population.

Notons que les avantages unitaires sont à la fois fonction des gains de temps procurés par l'autoroute et des coûts, dont les coûts de péage. On constate notamment que dans cet exemple, pour un péage supérieur à 0,2 €/km, le gain de temps procuré par l'autoroute par rapport à la référence est compensé par les coûts supplémentaires (péage) pour une valeur du temps de 18,7 €/h. Cela implique donc un avantage négatif pour les usagers de l'autoroute, alors même qu'ils empruntent l'autoroute et qu'ils en retirent donc un bénéfice (notons que la route en option de projet est systématiquement plus intéressante que la route en option de référence).

Figure 6 : Avantages unitaires en fonction du niveau de péage sur l'autoroute, modèle prix-temps



Pour une valeur de péage nulle, presque tout le trafic est sur l'autoroute (car la capacité de l'autoroute permet d'écouler toute la demande sans dégradation significative des conditions de circulation). La valeur moyenne de la valeur du temps des usagers de l'autoroute est égale à la valeur moyenne sur l'ensemble de la population. Ainsi, pour un péage nul, la méthode classique (avantages calculés avec la valeur du temps moyenne) donne un résultat identique à la méthode des avantages distribués.

L'avantage unitaire des usagers de la route est strictement décroissant dans la méthode classique (plus le tarif de l'autoroute est élevé, plus il y a de trafic sur la route et donc moins les gains de temps sont importants). Dans le cas de la méthode des avantages distribués, l'avantage unitaire des usagers de la route commence par croître avec le niveau de péage avant de décroître. En effet, le gain important en temps de parcours pour des péages faibles est compensé par une valeur du temps faible des usagers de la route. La forme de la distribution log normale fait qu'il existe un maximum de l'avantage unitaire des usagers de la route autour de 0,12 €/km. Par la suite, l'augmentation de la valeur du temps des usagers de la route ne compense plus la perte de gain de temps liée à un trafic plus élevé sur la route.

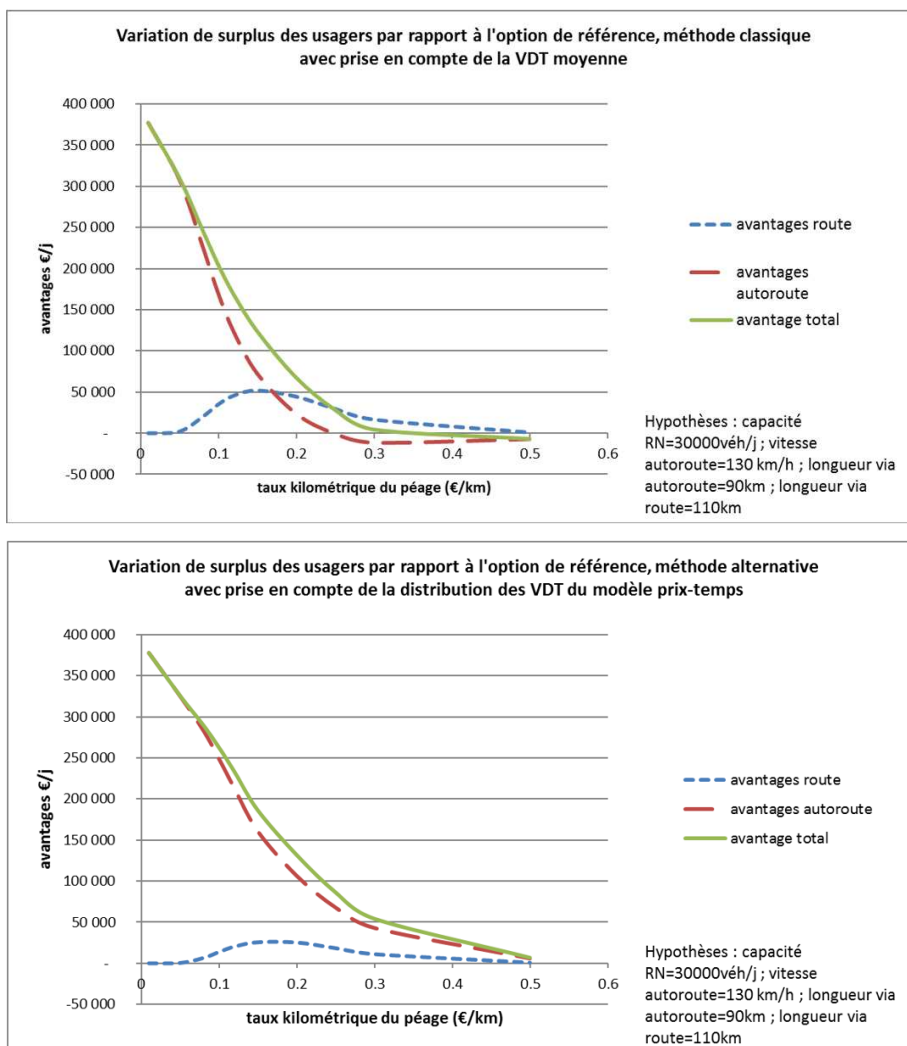
### Avantages totaux

Dans la méthode classique, les avantages des usagers de l'autoroute deviennent négatif au-delà de 0,2 €/km et les avantages totaux sont presque nuls dès 0,3 €/km alors que dans la méthode des avantages distribués (modèle prix-



temps), les avantages totaux restent significativement positifs (Figure 7).

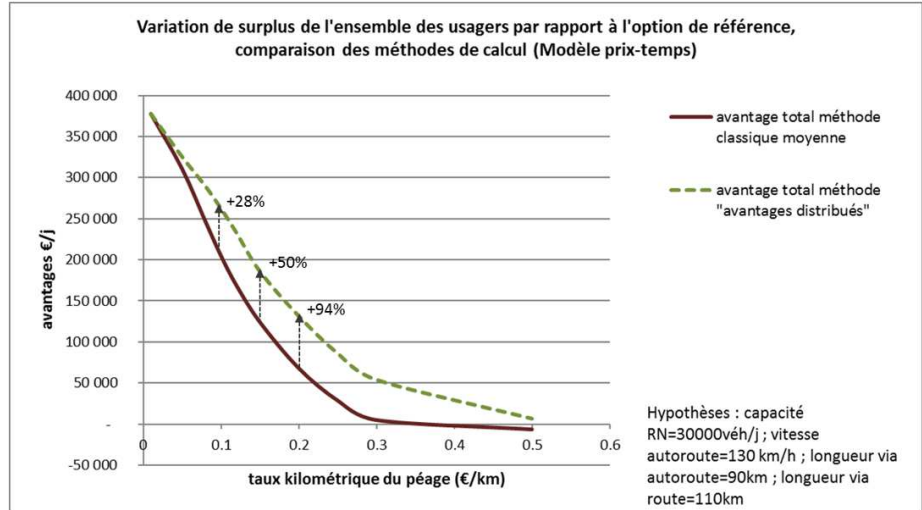
Figure 7 : Variation de surplus des usagers selon la méthode de calcul (méthode classique et méthode distribuée, modèle prix-temps)



Au-delà de ces effets observés sur des valeurs de péage élevées, on constate que dans cet exemple, les avantages évalués avec la méthode des avantages distribués sont systématiquement supérieurs aux avantages de la méthode classique, quel que soit le niveau de péage (Figure 8).

Les écarts mis en évidence entre les deux méthodes sont importants et très variables en fonction du niveau de péage pris en compte. Pour un péage de 0,12 €/km, les avantages usagers sont près de 40 % supérieurs dans la méthode « avantages distribués » par rapport à la méthode classique !

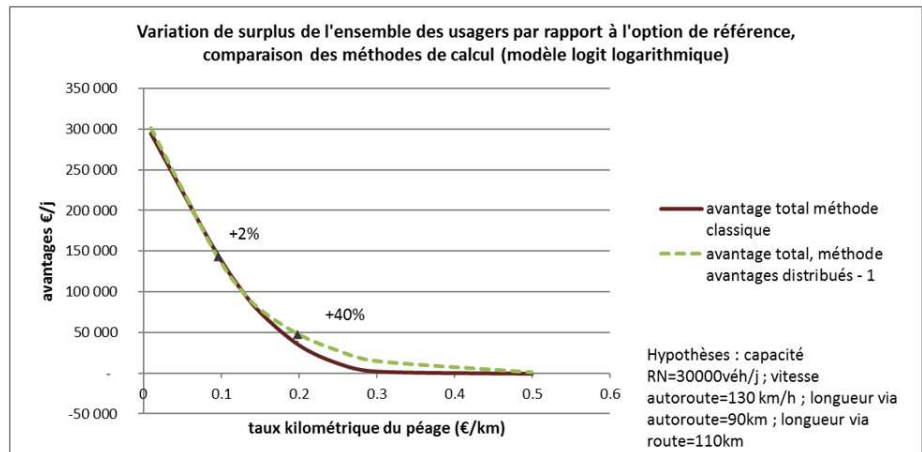
Figure 8 : Variation de surplus de l'ensemble des usagers par rapport à l'option de référence, comparaison des méthodes de calcul (Modèle prix-temps)



### Modification des résultats en fonction du modèle utilisé

Les résultats présentés pour le modèle prix-temps sont également valables pour le modèle logit logarithmique, mais avec des écarts entre méthode « classique » et « distribué » bien plus mesurés (Figure 9). Tant que le péage est faible et la part de marché de l'autoroute est importante, il n'y a pas beaucoup d'écart entre la méthode classique et la méthode « avantages distribués ».

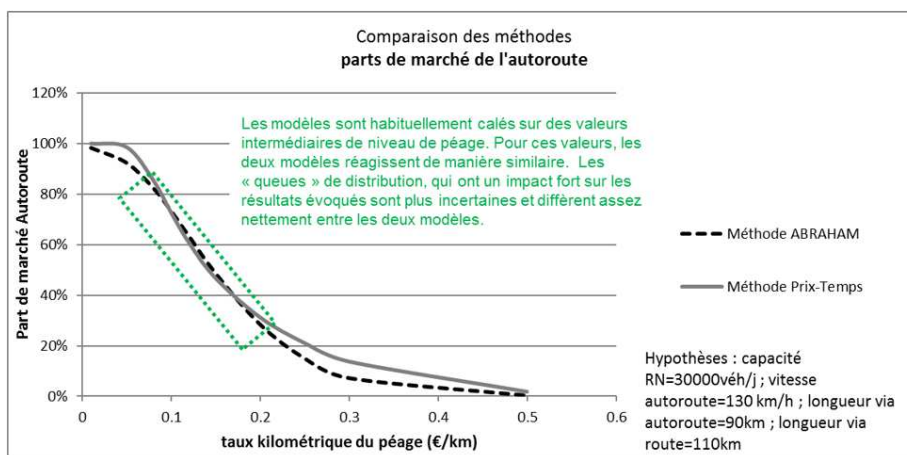
Figure 9 : Variation de surplus de l'ensemble des usagers par rapport à l'option de référence, comparaison des méthodes de calcul (Modèle logit logarithmique)



La somme pondérée des avantages sur l'autoroute est presque identique au produit de l'avantage moyen par le trafic autoroute. Pour des valeurs au-delà de 0,2 €/km, la méthode des avantages distribués permet d'être plus cohérente avec la logique économique des usagers : tant que des usagers empruntent l'autoroute, ils en retirent une utilité qui doit se retrouver dans un avantage non nul. L'écart entre la méthode classique et la méthode distribuée est de l'ordre de 40 % pour 0,2 €/km.

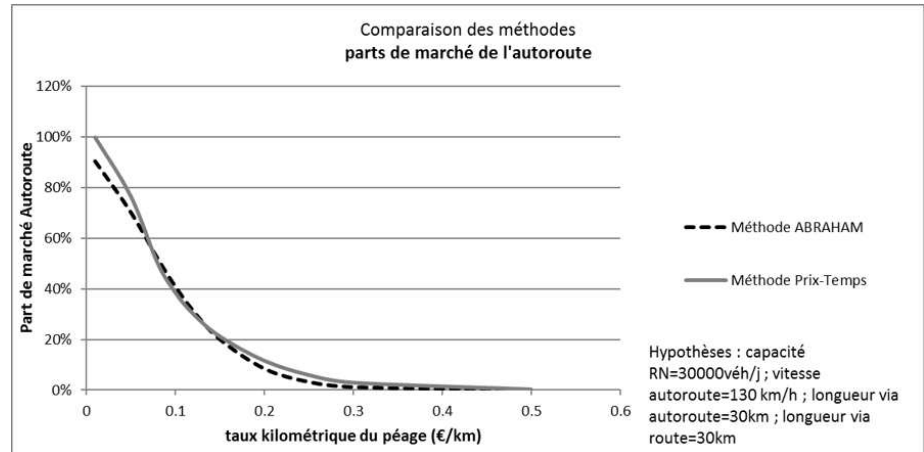
Notons enfin que les modèles sont habituellement calés pour des niveaux de tarif intermédiaires, inférieurs à 0,20 €/km. Sur ces plages, les deux modèles sont relativement cohérents dans l'exemple présenté (Figure 10). Les modèles diffèrent par contre pour des valeurs très faibles ou très élevées de niveau de péage. Dans la mesure où le choix du modèle utilisé a un impact non négligeable sur les résultats, il est important d'être vigilant dans les interprétations lorsque l'on s'éloigne des valeurs classiquement utilisées pour le calage.

Figure 10 : Comparaison des parts de marché de l'autoroute selon le modèle utilisé – projet long



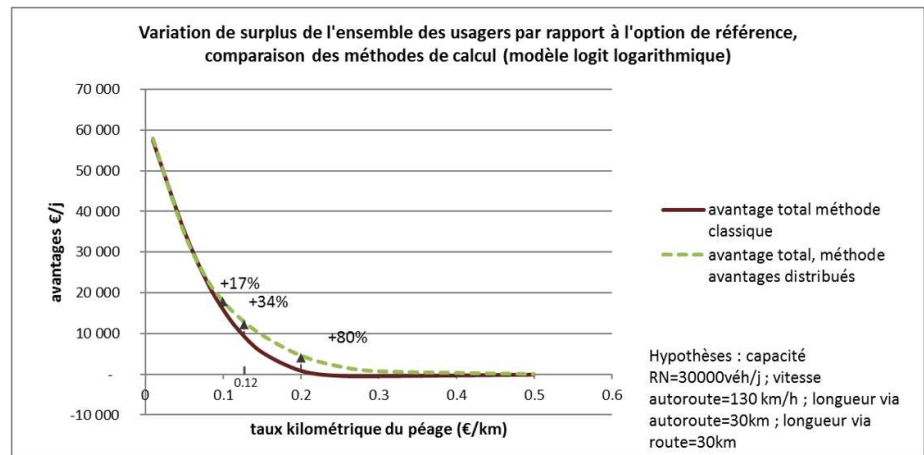
Dans le cas d'un projet plus court (30 km contre 110 km dans le premier exemple – la longueur de la route est également ramenée à 30 km), les deux lois se superposent mieux (Figure 11). Notons que quand on utilise la « Loi d'ABRAHAM », on l'applique à l'ensemble des trafics, quels que soient les coûts (ou la longueur des trajets), ce qui signifie que les avantages estimés interviennent en fonction des gains relatifs. La longueur du projet peut donc avoir un impact sur les gains des itinéraires, modifiant la forme de la courbe de part de marché en fonction du niveau de péage.

Figure 11 : Comparaison des parts de marché de l'autoroute selon le modèle utilisé – projet de 30 km



Dans ce cas de figure (longueurs de la route et de l'autoroute de 30 km), la méthode des avantages distribués appliquée à un modèle logit logarithmique a un impact plus important que dans le précédent exemple : à 0,15 €/km, l'écart atteint déjà près de 80 % (Figure 12).

Figure 12 : Variation de surplus des usagers, comparaison des méthodes de calcul (modèle logit logarithmique, projet court)



### 3.4. ÉLÉMENTS DE GÉNÉRALISATION

La mise en œuvre de plusieurs scénarios faisant varier la longueur du projet, la vitesse à vide sur autoroute et la capacité de la route parallèle permet de mettre en perspective les résultats précédents. Dans le cas du modèle prix-temps, les avantages totaux sont systématiquement plus élevés avec la méthode distribuée qu'avec la méthode classique dans les 9 cas étudiés. La différence distribué-classique se réduit dans le cas d'une forte congestion sur

la route parallèle.

Dans le cas du modèle « ABRAHAM », nous l'avons vu, les méthodes distribuées et classiques sont plus proches. Pour certains cas de figure (congestion plus forte notamment), la méthode distribuée donne même, pour des valeurs de péages faibles, des avantages totaux plus faibles que la méthode classique. La sous-estimation des méthodes classiques n'est donc pas systématique avec ce modèle.

On retiendra donc que selon le type de modèle utilisé (et les paramètres de calage choisis), il existe des différences importantes dans les valeurs des avantages calculés.

Ainsi, quelle que soit la loi comportementale utilisée (modèle prix-temps ou logit logarithmique), pour les configurations classiques de projet testés (compétition route-autoroute selon différentes caractéristiques de distance, de vitesse et de niveau de congestion), **la méthode classique de calcul sous-estime les avantages des usagers par rapport à une méthode « distribuée »** qui utilise directement la distribution des utilités issue du modèle de trafic **pour des valeurs élevées de péage**. Cette sous-estimation est systématique pour le modèle prix-temps mais dépend de la configuration (distance, congestion) pour le modèle « ABRAHAM ».

#### 4. ENSEIGNEMENTS

Comment réconcilier le calcul théorique des surplus correspondant aux modèles de choix discrets, et les valeurs « tutélaires » des avantages moyens ? Si la méthode utilisant la distribution des avantages issue des modèles est plus cohérente avec la logique économique, les résultats dépendent fortement du modèle utilisé (forme et calage).

Si la littérature scientifique établit depuis la fin des années 70 (WILLIAMS, 1977 ; DALY, ZACHARY, 1978 ; SMALL, ROSEN, 1981) la pertinence de l'utilisation des utilités dérivées des modèles de choix discret pour l'estimation du surplus des usagers, peu de cas d'application sont recensés. Cela peut être expliqué par la forte dépendance des résultats à la formulation du modèle (que nous avons également mise en évidence ici), rendant impossible toute comparaison entre projets évalués avec des modèles différents. L'utilisation de modèles uniques (modèles nationaux ou régionaux sur lesquels sont testés les différents projets) rendraient possible une utilisation plus systématique d'un calcul « distribué ». Il existe aujourd'hui en France de nombreux modèles différents qui sont très peu partagés par les acteurs. Cette configuration limite fortement la pertinence des méthodes de calcul des avantages « distribués ». Cependant, au sein d'une entité qui dispose d'un modèle unique sur lequel sont testés les différents projets (l'État avec le nouveau modèle national sous Transcad, les collectivités locales disposant d'un modèle multi-modal multi-partenarial, SNCF Réseau utilisant un modèle national...), il

semblerait pertinent d'envisager le double calcul méthode distribuées-méthodes classiques.

Ainsi, il n'est sans doute pas d'autre solution en France aujourd'hui que de considérer que les avantages et les coûts intervenant dans les formules du calcul socio-économique sont déduits des données recommandées par les instructions officielles. Mais nous considérons qu'il pourra être très instructif de comparer le résultat du calcul avec celui déduit des valeurs révélées par les comportements réels issus des modèles. Cette recommandation est partagée par ROQUIGNY (2014). Il paraît également important d'indiquer le caractère minorant, donc prudent, du mode de calcul recommandé pour des projets au coût d'usage élevé. Le calcul complet pourra être exécuté, notamment par les acteurs qui disposent d'un modèle unique servant à l'évaluation de plusieurs projets, au moins pour avoir un ordre de grandeur de la marge de sécurité que procure le calcul classique.

## BIBLIOGRAPHIE

### ARTICLES SCIENTIFIQUES ET OUVRAGES

ABRAHAM CL., THOMAS A. (1970) **Microéconomie. Décisions optimales dans l'entreprise et la nation**. Paris, Dunod.

ABRAHAM CL., COQUAND R. (1961) La répartition du trafic entre itinéraires concurrents ; réflexions sur le comportement des usagers ; application au calcul des péages. **Revue Générale des Routes et des Aéroports**, n° 357, pp. 57-76.

ABRAHAM CL., BAUMGART T., BLANCHET J.-D. (1969) Un modèle de prévision du trafic aérien intérieur. **Revue du Secrétariat Général à l'Aviation Civile**, n° 136.

ARROW K.J (1963) **Social choice and individual values**. New York, Wiley.

BATES J. (2003) **Economic Evaluation and Transport Modelling: Theory and Practice**. 10th International Conference on Travel Behaviour Research. Lucerne.

BEN AKIVA M. (1973) **Structure of Travel Demand Model**. MIT, PhD Dissertation.

BEN AKIVA M., LERMANS S. (1985) **Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand**. The MIT Press.

BIERLAIRE M. (1997) **Discrete choice models**. MIT.

BONNAFOUS A., MASSON S. (2003) Évaluation des politiques de transport et équité spatiale. **RERU**, n° 4, pp. 547-572.

BONNEL P. (2004) **Prévoir la demande de transport**. Presse de l'ENPC.

CHEVASSON G. (2007) L'influence relative des différentes valeurs tutélaires : une étude par la sensibilité des indicateurs socio-économiques. In J. MAURICE, Y. CROZET (éds) **Le calcul économique dans le processus de choix collectif des investissements de transport**. Economica.

DALY A.J., ZACHARY S. (1978) Improved multiple choice models. In D.A. HENSHER, M.Q. DALVI (Eds.) **Determinants of Travel Choice**. Saxon House.

DE JONG G., DALY A., PIETERS M., VAN DER HOORN T. (2007) The logsum as an evaluation measure: Review of the literature and new results. **Transportation Research part A**, Vol. 41, n° 9, pp. 874-889.

DE JONG G., MARITS P., DALY A., GRAAFLAND I., KROES E., KOOPMANS C. (2005) **Using the Logsum as an evaluation measure - Literature and Case Study**. Rand Europe Working paper.

DUPUIT J. (1844) De la mesure de l'utilité des travaux publics. **Annales des Ponts et Chaussées**, 2<sup>ème</sup> série, Mémoires et Documents, n° 116, t. VIII, pp. 332-375.

LESOURNE J. (1972) **Le calcul économique**. Dunod.

LOUVIERE J.J., HENSHER D.A., SWAIT J.D. (2000) **Stated Choice Methods: Analysis and Application**. Cambridge University Press.

McFADDEN D. (1973) Quantal Choice Analysis. A Survey. **Annals of Economic and Social Measurements**, Vol. 5, pp. 363-390.

McFADDEN D. (1973) **Conditional Logit Analysis of Qualitative Choice Behavior in Frontiers of Economics**. New York Academic Press.

MANSKY C. (1977) The structure of random utility models. **Theory and Decision**, Vol. 8, n° 3, pp. 229-254.

ORTUZAR J.D., WILLUMSEN L.G. (2001) **Modelling transport**. John Wiley and Sons.

RAUX S., SOUCHE S., MERCIER A. (2007) De l'équité à l'acceptabilité des politiques de transport : que peut le calcul économique ? In J. MAURICE, Y. CROZET **Dimensions critiques du calcul économique**, Prédit, 15 p.

SMALL K., ROSEN H. (1981) Applied Welfare economics with Discrete Choice Models. **Econometrica**, Vol. 49, n° 1, pp. 105-130.

WILLIAMS H.C.W.L. (1977) On the formation of travel demand models and economic evaluation measures of user benefit. **Environment and Planning A**, Vol. 9, n° 3, pp. 285-344.

ZHAO Y., KOCKELMAN K., KARLSTROM A. (2008) Welfare calculations in discrete choice settings: the role of error term correlation. **87th Annual meeting of the Transportation Research Board**.

*RAPPORTS, TEXTES DE LOI*

CERTU (1998) **Comportements de déplacements en milieu urbain : les modèles de choix discret**. Lyon, Dossiers du Certu.

CERTU (2003) Modélisation des déplacements urbains de voyageurs.

COMMISSARIAT GÉNÉRAL DU PLAN (1994) **Transports : pour un meilleur choix des investissements**. Rapport du groupe de travail présidé par M. BOITEUX. La Documentation Française.

COMMISSARIAT GÉNÉRAL DU PLAN (2001) **Transports : choix des investissements et coût des nuisances**. Rapport du groupe de travail BOITEUX. La Documentation Française.

COMMISSARIAT GÉNÉRAL DU PLAN (2005) **Le prix du temps et la décision publique**. Rapport du groupe de travail présidé par D. LEBEGUE. La Documentation Française.

DIRECTION GÉNÉRALE DES ROUTES (2007) **Instruction relative aux méthodes d'évaluation des investissements routiers interurbains**.

DIRECTION GÉNÉRALE DES INFRASTRUCTURES DES TRANSPORTS ET DE LA MER (2014) **Note technique du 27 juin 2014 relative à l'évaluation des projets de transport**.

JEANNIÈRE E., JEANNESSON-MANGE E., COUSIN P. (2010) **Les outils d'évaluation des projets routiers - D'Ariane à TransCAD**. Sétra, Rapport d'études.

MEUNIER D. (2014) **Calcul du surplus de l'utilisateur. Contribution au rapport « L'évaluation socio-économique en période de transition »**. Commissariat général à la stratégie et à la prospective, Rapports & documents.

MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT, DES TRANSPORTS, DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE, DU TOURISME ET DE LA MER (25 mars 2004, māj 27 mai 2005) **Instruction cadre relative à l'évaluation des grands projets d'infrastructure de transport**.

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE (2014) **Instruction du Gouvernement du 16 juin 2014 relative à l'évaluation des projets de transport**.

ROQUIGNY Q. (2014) **Valeurs du temps. Contribution au rapport « L'évaluation socio-économique en période de transition »**. Commissariat général à la stratégie et à la prospective, Rapports & documents.