

# Fiabilité des temps de déplacements des voyageurs

Version du 03 mai 2019

## Introduction

La fiabilité des temps de parcours prend une part croissante dans les attentes des usagers, et a un impact dans l'économie à la fois pour les personnes (productivité de l'activité économique liée au respect d'horaires précis, effets sur le bien-être et sur la santé) et pour les marchandises (organisations en juste à temps par exemple) qu'il convient de valoriser.

Cette fiche présente tout d'abord les différentes méthodes de valorisation de la fiabilité et leur domaine de pertinence. Des recommandations pour la prise en compte de la fiabilité des temps de trajets dans les évaluations de projets de transport sont ensuite proposées, en abordant successivement la question de l'analyse de la fiabilité des temps de déplacements puis de la valorisation de la fiabilité.

Cette fiche traite de la fiabilité des temps de parcours pour le transport de voyageurs mais ne traite pas de la fiabilité des temps de parcours du transport de marchandises.

## Méthodes de valorisation de la fiabilité

La valorisation des projets par leur effet sur les temps de parcours recouvre deux composantes :

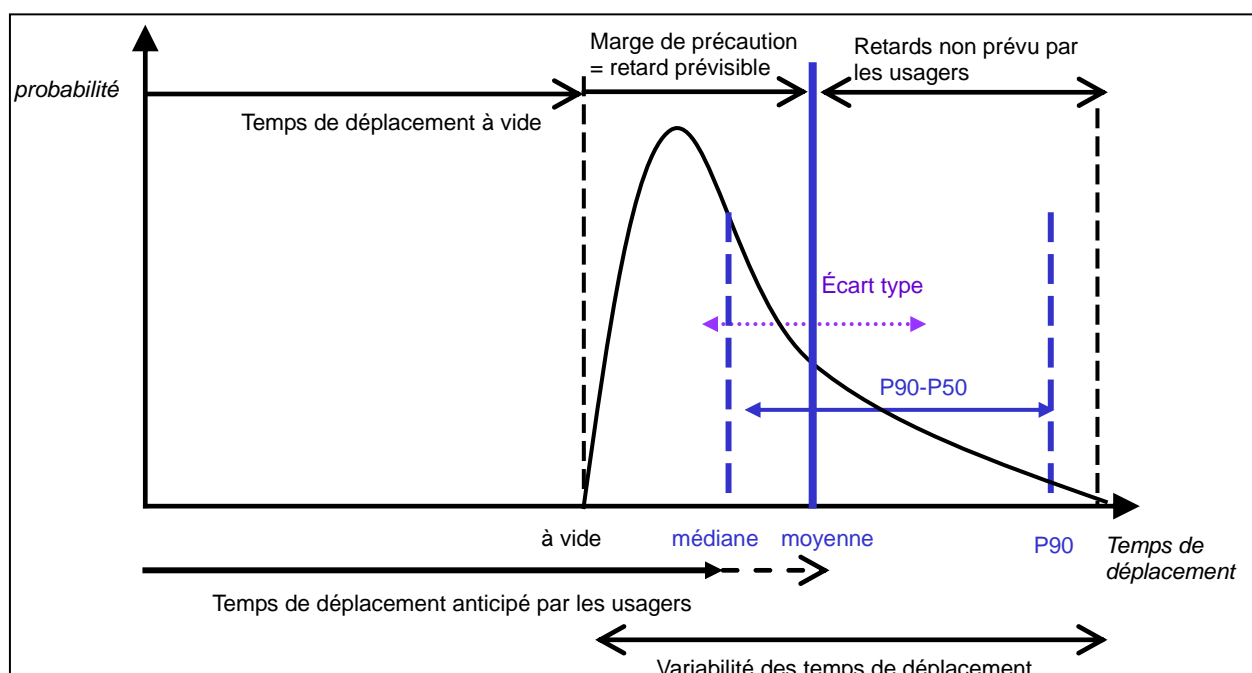
- la valorisation des gains de temps, pour laquelle les méthodes sont éprouvées et reconnues (cf. dans le paragraphe « surplus des usagers » de la fiche *Monétarisation des effets et indicateurs socio-économiques*) ;
- la prise en compte des gains liés à l'amélioration de la fiabilité des temps de parcours, pour laquelle différentes méthodes existent, qui sont moins éprouvées que celles portant sur les gains de temps notamment en termes de niveau de valorisation des gains de fiabilité. C'est l'objet de la présente fiche.

Les projets doivent donc faire l'objet tout d'abord d'une évaluation et valorisation des gains de temps (cf. paragraphe sur le calcul de surplus de la fiche *Monétarisation des effets et indicateurs socio-économiques*).

Afin de pouvoir additionner ces deux composantes (temps moyen et fiabilité des temps de déplacements), il est nécessaire de vérifier deux hypothèses :

- la valorisation des gains de temps doit être estimée par le biais de la moyenne des temps de parcours et non une autre mesure telle que par exemple, le temps nominal ;
- la valeur du temps ne doit pas comprendre de composante liée à la valorisation de la fiabilité. Or, tel est le cas lorsque la valeur du temps est issue d'une modélisation dont la fonction d'utilité ne comprend pas de paramètre de fiabilité : la valeur du temps révélée comprend alors une valorisation de la fiabilité, qui est souvent corrélée avec la moyenne des temps de parcours. Cependant, l'état des connaissances ne permettant pas d'apprécier l'écart sur la valeur du temps ainsi constitué, le maître d'ouvrage pourra, en l'absence d'hypothèses supplémentaires, additionner la valeur du temps moyen et la valorisation de la fiabilité.

Figure 1 : Distribution des temps de déplacements et indicateurs de fiabilité ; cas où le temps de parcours anticipé est égal à la moyenne



L'évaluation des projets en termes d'effet sur la fiabilité des temps de déplacements peut être décomposée en deux questions selon l'objectif de l'analyse :

- hiérarchisation des projets ou variantes en termes de fiabilité de temps de déplacement, ou
- intégration des gains de fiabilité dans les indicateurs de rentabilité du calcul socio-économique.

En termes de hiérarchisation des projets et variantes de projets, les différentes méthodes/indicateurs de fiabilité proposés peuvent être utilisés en fonction des données disponibles et projetables et de la pertinence de l'indicateur au vu de l'analyse de données et du type de projet.

En termes d'intégration des gains de fiabilité dans les indicateurs de rentabilité du calcul socio-économique, il s'agit d'assurer la cohérence des niveaux de valeurs obtenus par les différentes méthodes en utilisant les différentes méthodes dans leur domaine de pertinence.

D'une manière générale, étant données les incertitudes sur le niveau de valorisation de la fiabilité au regard des études françaises et internationales sur le sujet, il est recommandé d'effectuer des tests de sensibilité sur les indicateurs de fiabilité retenus ainsi que sur les ratios de valorisation de la fiabilité utilisés afin d'encadrer les gains de fiabilité dus au projet.

La valorisation des gains de fiabilité comprendra donc notamment une comparaison avec les gains de temps seuls, calculés selon la même segmentation que les gains de fiabilité.

### **Méthodes de valorisation : principe**

La valorisation de la fiabilité des temps de parcours peut se faire, schématiquement, selon trois niveaux de précision croissante :

- 1) de façon exogène au modèle de trafic utilisé, en calculant le surplus lié à une variation de la distribution des temps de parcours. Les caractéristiques de la distribution des temps de parcours peuvent être estimées notamment en fonction de caractéristiques de l'infrastructure, du service et du trafic, et de facteurs de variabilité exogènes ;
- 2) par l'intégration d'indicateur de fiabilité simple dans le modèle de trafic statique ;
- 3) de façon endogène, en utilisant un modèle de choix d'horaire avec des temps de parcours aléatoires qui permet de capter explicitement le coût du déshorage et de la fiabilité.

À ce stade, il est recommandé a minima de prendre en compte l'amélioration de la fiabilité des temps de parcours par une approche exogène au modèle de trafic, décrite dans la présente fiche (niveau 1).

De façon simplifiée et, notamment, sans trafic induit par origine-destination (OD), les avantages de fiabilité annuels non actualisés par OD se calculent selon la formule suivante :

$$A_{fiabilité} = \sum_{\text{jours ouverts } j} \sum_h (I_{fiabilité_{ref,j,h}} - I_{fiabilité_{proj,j,h}}) \cdot R_I \cdot VdT \cdot Trafic_{h,j} \quad (1)$$

avec  $I_{fiabilité_{ref,j,h}}$  : indicateur de fiabilité en option de référence (resp. de projet), en minutes, à la période horaire h et pour les jours j

$R_I$  le ratio de fiabilité associé à l'indicateur  $I_{fiabilité_{ref,j,h}}$

$Trafic_{h,j}$  : trafic (nombre d'usagers) sur l'OD à la période horaire h et pour les jours j sur lesquels sont calculés les indicateurs de fiabilité (par exemple trafic de 9h à 10h sur les jours ouvrés)

$VdT$  : valeur du temps par usager (en €/min)

*NB : cette formule est simplifiée par souci de pédagogie et ne considère pas le trafic induit sur l'OD. La fiche **Monétarisation des effets et indicateurs socio-économiques** détaille le calcul du surplus des usagers, et les mêmes principes que pour les gains de temps s'appliquent aux gains de fiabilité.*

### **Les méthodes de valorisation de la fiabilité dans la littérature**

Trois grandes catégories de méthode de valorisation de la fiabilité peuvent être distinguées parmi la littérature et les pratiques de valorisation de la fiabilité :

- la méthode des **variations compensatoires**, qui consiste à calculer l'augmentation du temps de trajet espéré que l'utilisateur est prêt à subir pour éviter la variabilité des temps de trajet et avoir un temps de trajet certain. Ce temps de déplacement équivalent dépend notamment de l'aversion au risque de l'utilisateur, de son temps de trajet moyen et de l'ensemble de la distribution des temps de déplacements. L'application proposée de cette méthode dans cette fiche repose sur une enquête de préférences déclarées menée en Ile-de-France (enquête MIMETTIC). Le calibrage proposé de la méthode est valable pour des trajets de temps moyen inférieur à deux heures ;
- les méthodes **moyenne-dispersion**, basées sur des indicateurs de fiabilité agrégés (moyenne, écart-type, P90-P50, ou autres déciles). Ces méthodes sont utilisées à la fois pour les modes routiers et ferroviaires. Elles sont estimées dans la littérature internationale à partir d'enquêtes de préférences déclarées et révélées. La méthode moyenne-écart-type est utilisée dans la plupart des recommandations des pays qui intègrent la fiabilité dans l'évaluation socio-économique (Royaume-Uni, Pays-Bas, Allemagne, Nouvelle-Zélande, Australie notamment) ;
- les méthodes **moyenne-retard**, qui sont une variante spécifique aux transports collectifs des méthodes moyenne-dispersion, avec l'utilisation de la moyenne des retards à l'horaire affiché comme indicateur de fiabilité.

### **Différences entre les méthodes**

Ces trois types de méthodes donnent, dans la grande majorité des cas, des hiérarchisations de projets et variantes similaires, bien que les niveaux de valorisation mesurés puissent différer en fonction des ratios de valorisation de fiabilité utilisés et de la nature même des méthodes.

La méthode de la variation compensatoire valorise l'ensemble de la distribution des temps de déplacements. Elle est donc sensible aux queues de distributions, y compris aux valeurs extrêmes (au-delà de P90), contrairement aux autres méthodes proposées dans cette fiche. Ainsi, à titre d'exemple, dans le cas d'un projet permettant de réduire les 5% de retards les plus longs pour des trajets de moins

de deux heures, les méthodes moyenne-dispersion et moyenne-retard sous-estimeront les gains de fiabilité par rapport à la méthode de la variation compensatoire : les méthodes moyenne-écart-type et moyenne-retard sous-estimeront les gains tandis qu'avec la méthode P90-P50, ces gains seront nuls car non captés par l'indicateur P90-P50.

Le calcul par la méthode des variations compensatoires est sensible à l'aversion au risque quand la distribution des temps de parcours présente une queue de distribution très grande (par exemple des retards de plus de 100 minutes sur des trajets de l'ordre d'une heure ou moins). Il convient donc d'être particulièrement vigilant à la validité des queues de distributions estimées (nombre d'observations suffisant, vérification des causes des grands retards observés) et d'analyser finement l'effet – ou l'absence d'effet – du projet sur ces queues de distribution.

Contrairement aux autres méthodes, la méthode des variations compensatoire avec une fonction CRRA valorise de façon différenciée les retards sur des trajets longs ou courts car elle valorise les retards relativement au temps de trajet moyen et non en absolu<sup>1</sup>. Ainsi, plus le retard est petit relativement au temps de trajet plus la variation compensatoire est faible : pour un trajet de 30 minutes, un retard de 10 minutes sera valorisé plus fortement qu'un même retard de 10 minutes sur un trajet de 2 heures. Il convient de noter que l'aversion au risque testée dans le rapport a été calibrée pour des trajets de moins de deux heures (à partir de l'enquête MIMETTIC).

Les méthodes écart type ou P90-P50 ne seront, quant à elles, pas sensibles à la variation du temps de parcours moyen et peuvent, dans certains cas, fortement surestimer les gains de fiabilité par rapport à la méthode des variations compensatoires, par exemple dans le cas d'un gain d'une minute sur le P90-P50 d'un trajet de 2 heures. Quelle que soit la méthode de calcul des gains de fiabilité, si les calculs sont menés par arc et non par OD comme il convient de le faire, les gains de fiabilité des usagers seront surestimés. Cette surestimation sera particulièrement importante dans le cas de l'utilisation de la méthode des variations compensatoires.

L'indicateur P90-P50 permet de mesurer la largeur ou l'étalement de la distribution des temps de déplacement. L'indicateur P90-P50 peut être plus pertinent que l'écart-type pour évaluer les projets présentant des distributions de temps de déplacements asymétriques. La méthode utilisant l'indicateur P90-P50 n'est cependant pas sensible aux retards au-delà du P90 donc aux variations spécifiques des 10% de temps de parcours les plus longs donc si le projet modifie principalement ces retards extrêmes, cette méthode sous estimera les gains de fiabilité par rapport à la méthode des variations compensatoires.

La méthode moyenne-dispersion avec l'indicateur P90-P50 est relativement simple d'utilisation, notamment en termes de projection des effets du projet<sup>2</sup>, mais ne valorise qu'une partie de la distribution des temps de parcours. Cette approche revient en effet à considérer que les arrivées en avance ne sont pas dommageables. Contrairement à la méthode des variations compensatoires qui valorise l'ensemble de la distribution, le choix du décile P90 peut, dans le cas d'un nombre d'observations de temps de parcours limité, induire des effets de seuil<sup>3</sup>.

Le modèle moyenne-retard comprend deux éléments : le temps « prévu » qui est le temps de trajet entre l'heure de départ et l'heure prévue d'arrivée, et la moyenne du retard à destination qui est la moyenne de temps de trajet entre l'heure prévue d'arrivée et l'heure réelle d'arrivée. L'avantage de

---

<sup>1</sup> Cet effet est lié au choix d'une fonction d'utilité de type CRRA et non CARA. Le choix de ce type de fonction d'utilité a été fait sur la base des résultats comparés des deux méthodes (CARA ou CRRA) sur les réponses à l'enquête MIMETTIC (et montré également dans de Palma et Picard, 2005).

<sup>2</sup> Une méthode de projection de l'indicateur P90 est proposée en annexe à titre illustratif.

<sup>3</sup> Par exemple, des gains sur le P90 de l'ordre de la minute pourront induire des gains de fiabilité surestimés par rapport au calcul de variation compensatoire, notamment en relatif par rapport au temps de parcours moyen ou médian. Par ailleurs, le choix du P90 peut induire des effets de seuil dans le cas de distributions calculées sur une période de temps restreinte : une distribution fondée sur une vingtaine de points par exemple pourra donner des résultats très sensibles au décile choisi. Il conviendra alors d'utiliser la méthode des variations compensatoire ou de faire des tests de sensibilité avec d'autres déciles de la distribution (P80 ou P85 plutôt que P90 par exemple).

cette méthode est qu'elle ne nécessite pas de connaître la distribution des temps de parcours et elle est de ce fait adaptée aux transports collectifs. En revanche, elle est sensible à un horaire théorique qui pourrait être considéré comme conventionnel. Il est donc recommandé, chaque fois que cela est possible, de chercher à estimer la distribution des temps de parcours pour utiliser la méthode des variations compensatoires ou la méthode moyenne-dispersion.

### *Avantages et inconvénients de chaque méthode*

Le tableau ci-dessous illustre les avantages et inconvénients de chacune des méthodes proposées dans cette fiche.

<b>Méthode</b>	<b>Indicateurs</b>	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<b>Variations compensatoires</b>	Distribution complète des temps de trajet	Convient pour trajets courts ou longs Valorise les gains de fiabilité relativement au temps de trajet moyen	Nécessite de connaître ou de modéliser la distribution complète des temps de trajet Calibrée pour des trajets de moins de 2h Sensibilité forte aux queues de distribution
<b>Moyenne - dispersion</b>	P90 – P50	Ne nécessite que deux déciles de la distribution des temps de trajet	Valorise les gains de fiabilité indépendamment du temps de trajet moyen Ignore une part importante de la distribution des temps de trajet
	Écart-type	Ne nécessite que l'écart-type de la distribution des temps de trajet	Valorise les gains de fiabilité indépendamment du temps de trajet moyen Ne prend pas en compte l'asymétrie de la distribution
<b>Moyenne - retard</b>	Retard moyen	Simplicité d'application pour les transports en commun	Correspond à une utilité discontinue dont les limites sont fixées arbitrairement Caractère conventionnel du temps de trajet nominal Valorise les gains de fiabilité indépendamment du temps de trajet moyen

### **Recommandations pour l'application des méthodes**

#### *Schéma récapitulatif des recommandations*

Le schéma ci-contre donne les principales recommandations méthodologiques pour l'application des méthodes de valorisation de la fiabilité.

### Analyse de la situation existante

Recueil de données de temps de parcours par période horaire

Vérification de la validité statistique du recueil de données : le nombre de données récoltées suffit-il à valider la queue de distribution ?

Analyse de la nature des valeurs extrêmes de retard : le projet est-il susceptible de les supprimer ? (en fonction de leur nature)

Oui : conserver les queues de distribution pour les analyses en situations projetées

Non : « tronquer » à la distribution avec un retard maximal auquel on attribue la probabilité des retards supérieurs.

### Situation projetée : options de référence et de projet

Simulation des distributions de temps de parcours par OD à partir de l'analyse de la situation existante et des temps de parcours/retards modifiés par respectivement les options de projet et de référence :

- reconstitution des temps de parcours ou indicateurs de fiabilité par OD par composition des temps de parcours ou indicateurs de fiabilité par arc
- utilisation de modèles de simulation des temps de parcours.

### Valorisation des gains de fiabilité

Méthodes recommandées, à adapter aux spécificités du projet et notamment en fonction de l'analyse des effets du projet et des domaines de pertinence des méthodes de valorisation

Variations compensatoires : si temps de déplacements moyens inférieurs à deux heures

P90 – P50 ou moyenne - écart-type : en fonction de la symétrie de la distribution des temps de déplacements

Moyenne – retards : applicable aux projets de transports collectifs

### Tests de sensibilité :

- Vérification de la sensibilité aux hypothèses prises notamment sur les queues de distribution,
- Estimation des gains de fiabilité par une autre méthode, justifiée, et analyse des éventuelles divergences de résultats

Etant donné le caractère encore exploratoire des méthodes de projection des indicateurs de fiabilité et, plus généralement, des distributions de temps de déplacements des voyageurs, une attention particulière devra être apportée à la description et à la justification des méthodes employées et des hypothèses prises dans le cadre des calculs de fiabilité.

### Analyse des distributions de temps de déplacements

L'analyse quantitative de la fiabilité des temps de déplacements doit reposer sur une analyse des distributions des temps de parcours des usagers par origine-destination, en situation existante puis en option de référence et en option de projet.

L'encadré ci-dessous précise les caractéristiques des distributions de temps de déplacements à utiliser dans le cadre de l'évaluation des gains de fiabilité d'un projet de transports.

### Caractérisation des distributions des temps de déplacements

La fiabilité des temps de déplacements s'apprécie à partir de la distribution des temps de déplacements des usagers sur les origines-destinations impactées par le projet. Cette distribution doit être calculée :

- pour les jours ouvrés, **par plage horaire** : il s'agit de définir les distributions de temps de déplacement que les usagers peuvent anticiper en fonction de l'heure de la journée. Le choix de l'amplitude des plages horaires ou de la différenciation selon le jour de la semaine doit être fait en fonction de la variabilité des distributions de temps de parcours observées sur le périmètre du projet. Les variations saisonnières des trafics pourront être négligées en première approximation si ces variations ont un impact négligeable sur les distributions de temps de parcours ;

- sur un déplacement par usager (donc **par origine-destination**) ;

- à partir de temps de parcours mesurés sur une période temporelle suffisamment longue, et **avec suffisamment de données pour pouvoir calculer de façon satisfaisante des indicateurs tels que le 90<sup>ème</sup> percentile des temps de parcours**. Une période de quelques mois à un an semble raisonnable ;

- avec les volumes de trafic correspondants.

La segmentation de la demande impactée par ces distributions des temps de parcours, sur chaque OD et en fonction du motif et de la catégorie socio-professionnelle (CSP), permet d'affiner les analyses en termes d'impact de la fiabilité des temps de parcours sur les usagers. En effet, l'aversion au risque et donc la préférence pour des temps de parcours fiables augmente pour les motifs contraints comme un rendez-vous par rapport à des motifs moins contraints.

### *Analyse de la situation existante*

L'analyse en situation existante doit permettre de déterminer dans un premier temps le périmètre géographique et temporel pertinent au regard des déplacements concernés par le projet.

Afin d'éviter de survaloriser les gains de fiabilité des projets, il est nécessaire d'être particulièrement vigilant sur les analyses de distributions de temps de parcours en situation existante et d'analyser les causes de variabilité observée, en attachant une attention particulière aux queues de distribution.

Il s'agit dans un premier temps de procéder à un recueil des données de temps de parcours des usagers par OD en situation existante. À partir de ce recueil de données, un examen approfondi des queues de distribution (à partir du P80 notamment), de leurs causes et de leur validité statistique, doit être mené.

#### 1. Validité statistique des distributions

Dans le cadre des mesures de fiabilité, l'analyse des queues des distributions de temps de parcours est particulièrement importante mais pose des problèmes de validité statistique. En effet, les distributions de temps de déplacement doivent être calculées par plage horaire, en distinguant les jours ouvrés des jours non ouvrés. Il est donc nécessaire de mener le recueil de données sur une durée de plusieurs mois voire une ou deux années afin d'avoir une quantité suffisante de données pour pouvoir estimer de la façon la plus fiable possible la queue de la distribution des temps de déplacements.

#### 2. Analyse des valeurs extrêmes

Du fait de la question de validité statistique de la queue de distribution expliquée dans le paragraphe précédent et du fait de la sensibilité des calculs de fiabilité à ces queues de distribution, il convient d'analyser attentivement les causes des retards extrêmes observés le cas échéant.

Cette analyse des causes des retards doit permettre d'analyser si le projet est susceptible ou non de modifier ces retards extrêmes. Deux cas peuvent alors être distingués :

- si le projet est susceptible de modifier fortement les retards extrêmes, d'après l'analyse de leur cause, il convient de conserver les queues de distributions dans la suite des analyses ;

- si le projet ne les modifie pas substantiellement, du fait de l'incertitude sur la projection des queues de distribution, il est recommandé de « tronquer » la distribution avec un retard maximal auquel on attribue la probabilité d'occurrence des retards supérieurs à ce retard maximal.

### ***Situation projetée (options de référence et options de projet)***

L'analyse des effets du projet sur la fiabilité des temps de déplacements doit comprendre dans un premier temps une estimation de l'effet du projet sur la distribution des temps de parcours. Cette estimation peut être plus ou moins fine selon les données disponibles et projetables.

On notera en particulier que, dans les options de référence et de projet projetées, la distribution des temps de déplacement peut être :

- soit reconstituée à partir de la projection de quelques déciles<sup>4</sup> et d'une hypothèse sur la forme de la distribution des temps de parcours, choisie sur la base de l'analyse des données ;
- soit modélisée, à partir d'un modèle de simulation dynamique ou d'un modèle d'exploitation par exemple.

Dans les cas où les études de trafic, pour les modes routiers, ou les études d'exploitation, pour les transports collectifs, fournissent des distributions des temps de déplacements par origine-destination en option de référence et en option de projet sur l'ensemble de la période d'évaluation, des analyses fines pourront être menées sur les effets du projet sur ces distributions de temps de parcours.

Selon les projets et leur périmètre, il n'est toutefois pas toujours possible de connaître l'ensemble de la distribution des temps de déplacements. Il apparaît cependant important de s'efforcer *a minima* d'estimer les indicateurs de fiabilité suivants, en commençant par les plus déterminants pour les calculs de gains de fiabilité monétarisés :

- 90<sup>ème</sup> percentile (P90) et médiane des temps de parcours, qui sont des indicateurs permettant de mesurer la largeur de la distribution ;
- à défaut, temps moyen et écart-type.

Il est toujours possible d'utiliser d'autres déciles de la distribution des temps de parcours (ce peut être le 80<sup>ème</sup> ou le 95<sup>ème</sup> percentile par exemple), dès lors que ces déciles sont disponibles en situation avec et sans projet. Le 90<sup>ème</sup> percentile est cependant celui que l'état de l'art reconnaît comme le plus pertinent : schématiquement, des percentiles inférieurs à 80% fournissent souvent des valeurs trop peu écartées de la médiane par rapport aux valeurs des temps de parcours où les effets sur les usagers sont les plus sensibles ; à l'inverse, des percentiles trop extrêmes (> 95%) sont trop tributaires d'évènements exceptionnels, proches de la rupture de service, ce qui n'est en général pas l'objet des projets visant à améliorer la fiabilité « courante ».

Cependant, comme expliqué lors de l'analyse de la situation existante, il faut garder à l'esprit que le choix du ou des indicateurs de dispersion de la distribution des temps de parcours doit être adapté au projet concerné. Si précisément, l'objet du projet est de réduire le nombre d'évènements de probabilité très faible (politiques de sûreté ou de sécurité par exemple), il faudra adapter les percentiles choisis à la nature de ces projets.

### ***Reconstitution des distributions par OD à partir de données par section***

Les distributions de temps de parcours par OD et les différents indicateurs de fiabilité par OD ne peuvent pas être déduits par simple addition des indicateurs par arc, qui conduirait généralement à une

---

<sup>4</sup> Un exemple de méthode de projection du P90 pour des routes nationales en Ile-de-France est proposé en annexe à titre illustratif.



forte survalorisation des gains de fiabilité. Cet effet d'amortissement des gains de fiabilité avec la longueur de l'OD est particulièrement important dans le cas de l'utilisation de la méthode des variations compensatoires qui a la propriété de valoriser les gains de fiabilité relativement au temps moyen de trajet. Il est donc nécessaire de raisonner par origine-destination dans le cadre de la valorisation des gains de fiabilité des temps de déplacements.

En pratique, pour certains projets, il est possible de raisonner par composition des temps de parcours par section et créneau horaire c'est-à-dire en reconstituant des temps de parcours par OD en partant des temps de parcours par section observées. Ensuite, l'option de projet peut être recomposée à partir de cette même méthode de composition des données par section, modifiées en considérant que le projet annule tout ou partie de la variabilité des temps de parcours observée sur la section modifiée par le projet (par exemple dans le cas des voies réservées ou métros automatiques).

Pour les transports en commun et notamment pour le mode ferroviaire, les données généralement disponibles concernent les retards de train. La transposition des retards de trains en distributions de temps de parcours voyageurs est complexe et appelle des développements méthodologiques. Par conséquent, une simplification peut consister à considérer le temps de parcours nominal en temps de parcours de référence pour les usagers. Cette approche n'est cependant qu'une approximation qui nécessite d'être dépassée à terme.

En l'absence de modèles de simulation permettant de projeter les distributions de temps de parcours par OD, des méthodes de projection des indicateurs de fiabilité de temps de déplacements sont présentées à titre indicatif en annexe de la fiche.

*Étant donné le caractère encore exploratoire des méthodes de projection des indicateurs de fiabilité et, plus généralement, des distributions de temps de déplacements des voyageurs, une attention particulière devra être apportée à la description des méthodes employées et des hypothèses prises dans le cadre des calculs de distributions de temps de déplacements et d'indicateurs de fiabilité.*

### **Valorisation des gains de fiabilité**

Les recommandations qui suivent précisent les méthodes de valorisation à appliquer selon leur domaine de validité. Ces recommandations doivent être adaptées en fonction des spécificités du projet et notamment en fonction de l'analyse des effets du projet et des domaines de pertinence spécifiques de chacune des méthodes de valorisation de la fiabilité.

*En particulier, les temps de déplacements moyens pour lesquels les méthodes sont pertinentes, donnés ci-dessous à titre indicatif, peuvent être adaptés localement, notamment pour éviter la combinaison de plusieurs méthodes sur un même projet.*

### **Variations compensatoires**

Dans le cas où les temps de parcours moyens sont inférieurs à deux heures sur les principales OD impactées par le projet, il est possible d'utiliser la méthode des variations compensatoires dont l'application est précisée dans l'encadré suivant.

Étant donnée la sensibilité des mesures aux queues de distributions extrêmes, dans le cas où elles sont conservées dans l'analyse (donc si le projet les modifie substantiellement), il conviendra de réaliser des tests de sensibilité sur les effets du projet sur ces queues de distributions, ainsi que sur le niveau d'aversion au risque (par exemple, effectuer les calculs de variations compensatoires pour des aversions au risque de 0,5 ; 1 ; 1,5 et 2).

### Variation compensatoire

La méthode de la variation compensatoire consiste à calculer l'augmentation du temps de trajet que l'utilisateur est prêt à subir pour avoir un temps certain. En d'autres termes, la variation compensatoire  $CV(T; \theta)$  d'un usager avec une aversion au risque  $\theta$ , pour une distribution de temps de parcours  $T$ , le rend indifférent entre un temps de trajet risqué de moyenne  $E(T)$  et un temps de trajet certain  $E(T)+CV(T; \theta)$ . On a donc  $E[U(T;\theta)]=U(E(T)+CV(T; \theta); \theta)$  où  $U(.)$  est la fonction d'utilité de l'utilisateur.

Sous l'hypothèse d'une fonction d'utilité de type CRRA, c'est-à-dire que l'aversion au risque de l'utilisateur n'est pas modifiée si les temps de trajet sont multipliés par un facteur constant pour toutes les options et pour une distribution de l'aversion au risque au sein de la population  $\theta$ , la variation compensatoire s'écrit :

$$CV(T) = \left( \int_0^{+\infty} t^{1+\theta} f(t) dt \right)^{\frac{1}{1+\theta}} - E(t) \text{ pour } \theta \neq -1 \quad (2)$$

avec  $t$  le temps de parcours,

$f(t)$  la fonction de densité de la distribution des temps de parcours

$\theta$  l'aversion au risque. En première approche, il est possible d'utiliser une aversion au risque  **$\theta=1$  pour les véhicules particuliers et  $\theta=2$  pour les transports en commun**. Cependant, cette simplification ne permet pas de prendre en compte l'hétérogénéité de l'aversion au risque au sein de la population en calculant la distribution des gains de fiabilité. En effet, l'aversion au risque dépend notamment du motif de déplacement, du mode et de la catégorie socioprofessionnelle des usagers. La distribution de la variation compensatoire peut donc être mesurée pour les différents segments d'utilisateurs impactés par le projet. Des distributions de  $\theta$  sont donc proposées dans une annexe de la fiche (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

La variation compensatoire s'exprime en unité de temps (i.e. CV est de même unité que  $t$ ), il convient ensuite de lui appliquer la valeur du temps, pour obtenir les avantages de fiabilité par usager.

La méthode de valorisation de la fiabilité des temps de parcours avec la variation compensatoire consiste donc à calculer :

$$A_{fiabilité} = \sum_{\text{jours ouvrés } j} \sum_h (CV_{OD_{ref,j,h}} - CV_{OD_{proj,j,h}}) \cdot VdT \cdot Trafic_{h,j} \quad (3)$$

### Méthodes moyenne - dispersion

Dans le cas où la distribution des temps de parcours complète n'est pas disponible ou si les temps de parcours sont supérieurs à deux heures sur les principales OD impactées par le projet, il est recommandé d'utiliser un indicateur synthétique de fiabilité des temps de parcours. L'indicateur P90-P50 permet de mesurer la largeur ou l'étalement de la distribution des temps de déplacement. Le choix du décile P90 peut induire des effets de seuil qu'il conviendra d'analyser le cas échéant.

La méthode de valorisation de la fiabilité des temps de parcours avec l'indicateur P90-P50 consiste à calculer :

$$A_{fiabilité} = \sum_{\text{jours ouvrés } j} \sum_h ((P90 - P50)_{OD_{ref,j,h}} - (P90 - P50)_{OD_{proj,j,h}}) \cdot R_{P90-P50} \cdot VdT \cdot Trafic_{h,j} \quad (4)$$

avec  $R_{P90-P50}$  ratio de fiabilité de référence pour l'indicateur P90-P50, indiqué dans le **Tableau 1**.

L'indicateur P50 peut ne pas être facilement disponible, notamment en situation projetée. Dans ce cas il est possible d'utiliser d'autres indicateurs :

- pour les véhicules particuliers, la moyenne des temps de parcours, qui est une sortie classique des modèles de trafic par le biais de l'utilisation des courbes débit-vitesse, pourra être utilisée en approximation de la médiane. Cette simplification peut poser problème en cas d'asymétrie trop forte de la distribution et pour les cas où la moyenne des temps de parcours est supérieure au P90. Dans ce cas, il conviendra d'en rester à l'utilisation de la médiane.
- pour les transports en commun, la forme des distributions de temps de parcours ferroviaires justifie d'utiliser le temps de parcours nominal comme approximation de la médiane des temps de parcours.

En cas de faible asymétrie de la distribution des temps de déplacements, l'indicateur écart-type des temps de déplacements peut être utilisé en remplacement de l'indicateur P90-P50.

Dans tous les cas, l'indicateur retenu doit être adapté aux données disponibles et projetables, ainsi qu'aux enjeux du projet en termes de fiabilité des temps de déplacement.

### Méthodes moyenne - retards

Dans les cas où il ne serait pas possible de disposer de données sur la distribution des temps de parcours, la méthode des variations compensatoires et les méthodes moyenne-dispersion décrites ci-dessus ne seraient pas applicables. Il est alors possible d'utiliser une méthode de type moyenne-retard dont l'indicateur de valorisation de la fiabilité est :

$$A_{\text{fiabilité}} = \sum_{\text{jours ouverts } j} \sum_h \left( E(\text{Retards}_{OD_{n(i,j,h)}}) - E(\text{Retards}_{OD_{p(i,j,h)}}) \right) \cdot R_{\text{Retards}} \cdot VdT \cdot \text{Trafic}_{h,j}$$

Le calcul de cet indicateur revient à donner une pondération  $R_{\text{Retards}}$  aux retards par rapport au temps moyen de parcours, ou, de manière équivalente, une pondération  $(1 + R_{\text{Retards}})$  aux retards par rapport au temps de parcours nominal ou théorique. Cet indicateur est applicable aux transports collectifs qui disposent d'un temps de parcours nominal ou théorique.

Tableau 1 : Ratios de référence pour la valorisation de la fiabilité en fonction de l'indicateur de fiabilité retenu

Indicateur	Valorisation : R pour les VP	Valorisation : R pour les TC
P90-P50	0,9	1
Ecart-type	0,8	0,9
Moyenne-retards	1	1,1

### Tests de sensibilité

Au titre de tests de sensibilité, d'autres méthodes ou niveaux de valorisation pourront être utilisés. Les méthodes de valorisation de la fiabilité des temps de déplacement ont des domaines de pertinence variés en fonction du type de projet.

L'analyse des méthodes à mettre en place en fonction du projet doit prendre en compte à la fois :

- le domaine de validité de la méthode, en fonction du cadre dans lequel elle a été développée (mode de déplacement, type d'enquête, forme du questionnaire, etc.) ;
- le type d'effets que le projet est supposé générer : certaines méthodes sont plus adaptées à valoriser des petits ou moyens retards (méthode moyenne-écart-type), d'autres valorisent plutôt des retards en fonction d'un seuil prédéfini (méthodes de la famille moyenne- retards).

### ***Limites***

Les méthodes de valorisation considérées dans cette fiche s'appuient toutes sur l'hypothèse que la variabilité est un processus exogène. Or, la variabilité des temps de parcours affecte les choix des individus qui peuvent adapter leurs horaires de départ.

De plus, les modèles considérés ne permettent pas de mesure de la valorisation de la variabilité « exceptionnelle » induite par des évènements tels que les accidents, les grèves, etc. La perception de la variabilité a un impact différent sur le comportement des individus suivant qu'ils soient affectés directement par cette variabilité ou qu'ils en soient informés par d'autres personnes.

Les méthodes présentées dans cette fiche feront l'objet de retours d'expérience afin de consolider les recommandations présentées.

### **Éléments de bibliographie**

de Jong, Bliemer, On including travel time reliability of road traffic in appraisal Transportation Research Part A 73 (2015) 80–95

de Palma, A. et N. Picard (2005), Route Choice Decision and Travel Time Uncertainty, Transportation Research: a Policy and Practice, 39(4), 295-324.

DGITM, ENS Paris-Saclay, SNCF Réseau, Prise en compte de la fiabilité des temps de déplacement voyageurs dans le calcul socio-économique, 2017

DGITM, Prise en compte de la fiabilité des temps de parcours dans l'évaluation socio-économique des projets de transports : éléments pour les travaux à conduire, 2016 [[http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/FdR\\_fiabilite.pdf](http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/FdR_fiabilite.pdf)]

Fosgerau (2015), The valuation of travel time variability, DRAFT Discussion Paper, Prepared for the Roundtable: Roundtable on Quantifying the Socio-Economic Benefits of Transport, Paris, November 2015 ©OECD/ITF 2015,

Noland, R. and Small, K. (1995), Travel-time uncertainty, departure time choice, and the cost of Morning commutes, Transportation Research Record , Vol. 1493, pp. 150–158.

Vickrey, W. (1969), Congestion theory and transport investment, American Economic Review, 59, pp. 251-261.

Xiao, Y, N. Coulombel and A. de Palma (2016). The valuation of travel time reliability: does congestion matter? Transportation Research B, accepté pour publication.

## ANNEXES

Les deux annexes suivantes présentent des pistes de méthodes pour la projection d'indicateurs de fiabilité par OD pour le mode routier. Ces pistes sont présentées à titre indicatif et illustratif et devront être approfondies. Les méthodes doivent être adaptées aux choix de modélisation effectués et au contexte dans lequel se déroule le projet. Notamment, les coefficients proposés, calibrés sur des données de voies rapides urbaines d'Ile de France ; devraient être paramétrés localement quand les données nécessaires sont disponibles. Le détail des estimations menées et une succincte revue de littérature sur la projection des indicateurs de fiabilité sont présentés dans le rapport *Prise en compte de la fiabilité des temps de déplacement voyageurs dans le calcul socio-économique, 2017*.

### ANNEXE 1 : Calcul des indicateurs par O/D à partir des données par arc

Le passage de la distribution des temps de parcours par arc à celle par OD n'est pas simple lorsque l'hypothèse d'indépendance entre les distributions des temps de parcours n'est pas vérifiée, ce qui correspond à la situation fréquente de propagation des bouchons. Ce passage de l'arc à l'OD peut alors se faire selon différentes méthodes, en fonction des hypothèses prises sur les formes des distributions de temps de parcours des différents arcs et sur leurs corrélations. Il est notamment possible de calculer des corrélations entre arcs de façon simplifiée en fonction de la distance entre les arcs. La pertinence des différentes méthodes envisageables pour le cas des réseaux français devrait faire l'objet d'une analyse comparative afin d'identifier les méthodes les plus adaptées.

On considère ici que le projet modifie la variabilité des temps de parcours sur un tronçon donné et que l'on sait modéliser la variabilité sur ce tronçon mais pas sur les OD empruntant ce tronçon. À défaut de l'utilisation d'un modèle de simulation dynamique permettant d'avoir les distributions des temps de parcours par OD, trois premiers niveaux de calcul peuvent être réalisés, à choisir en fonction des données disponibles et des enjeux du projet :

- si la congestion est faible, il est possible de considérer que les temps de parcours sont indépendants et que les variances des arcs s'additionnent ;
- si l'on ne peut pas faire d'hypothèse d'indépendance des temps de parcours, un calcul simple appliquant un coefficient de transmission « de référence » aux gains du tronçon pour avoir les gains par OD, en fonction de l'importance estimée de la variabilité des temps de parcours hors de l'arc. Plus la variabilité de temps est forte sur les sections de l'OD non modifiées par le projet, plus ce coefficient sera fort. Le tableau ci-dessous donne des coefficients à titre illustratif, calculés sur une section de l'A4 en Ile-de-France et qui devront être confirmés par des travaux ultérieurs.

#### Coefficients de transmission des gains par OD par rapport aux gains sur la section de projet

% de variance hors de la section modifiée (variance OD-variance section)/variance OD	<10%	20%	40%	50%	60%	>90%
Coefficient de transmission des gains par section	100%	90%	70%	50%	20%	15%

On calcule alors : gains par OD = gains par section \* coefficient de transmission

- si l'on connaît les variances des temps de parcours par arc, il est possible de faire un calcul simplifié en modélisant la corrélation des temps de parcours par arc en fonction de la distance entre les arcs. Il s'agit alors de considérer une corrélation (constante dans le temps) entre les arcs et dépendant de la distance uniquement. La corrélation entre deux stations i et j, avec  $d_{ij}$  distance entre les stations i et j (en m), peut être approchée par une formule du type :

$$\rho_{i,j} \approx \begin{cases} 0.125 + 100 \cdot d_{i,j}^{-0.8}, & \text{pour } d_{i,j} > 400\text{m et } d_{i,j} < 5000\text{m} \\ 0 & \text{si } d_{i,j} > 5000 \text{ m} \\ 1 & \text{si } d_{i,j} < 400 \text{ m} \end{cases}$$

Ces coefficients peuvent être estimés localement à partir des données disponibles.

Le calcul de l'écart-type de l'OD à partir des écart-types des arcs qui composent l'OD est alors :

$$\tilde{\sigma}_{\text{temps,OD}} = \sqrt{\sum_{\text{arcs } i} \sigma_i^2 + 2 \cdot \sum_{\text{arcs } i} \sum_{\text{arcs } j \neq i} \rho_{i,j} \sigma_i \sigma_j} \quad \text{avec } \rho_{i,j} \text{ calculé avec les approximations ci-dessus.}$$

### ANNEXE 2 : Projection du 90<sup>ème</sup> percentile pour des projets routiers ; illustration en Ile-de-France

Pour les trajets routiers, des relations simples semblent exister entre le P90 des temps de parcours, la moyenne des temps de parcours et d'autres variables (nombre de voies, moment de la journée (matin/soir), sens de circulation, qualité de l'infrastructure et occurrence de travaux). Ces relations devraient faire l'objet d'un programme d'étude pour étendre l'analyse à d'autres types de route que les voies rapides franciliennes, et tester le caractère explicatif d'autres variables (autres caractéristiques de la voie, conditions météorologiques, accidents corporels, etc.).

Ce type de relation simple n'a pas été trouvé pour l'écart-type des temps de parcours sur les données routières d'Ile-de-France.

Deux modèles de projection du P90 de la **lenteur** (min/km) peuvent être proposés en fonction des données disponibles et des enjeux du projet :

- le premier comprenant uniquement des données aisément accessibles et projetables (moyenne des temps de déplacement, nombre de voies, période de la journée et direction). Ce modèle pourrait être utilisé pour les projets de transports qui modifient la congestion récurrente (augmentation de capacité surtout) :

$$P90 = -0.41 + 1.57 \times \mu + 0.025 \times nb\_voies + 0.039 \times matin + 0.082 \times soir + 0.089 \times sens(> Paris) + \varepsilon$$

- le second modèle inclut plus de variables explicatives, notamment travaux et accidents et pourrait donc être utilisé pour les projets ayant un impact principalement sur ces variables (par exemple, les projets de mesures de gestion de trafic) :

$$P90 = -0.44 + 1.57 \times \mu + 0.025 \times nb\_voies + 0.039 \times matin + 0.081 \times soir$$

$$+ 0.084 \times sens(> Paris) + 0.028 \times accidents + 0.031 \times IQRNinf14 + 0.038 \times travaux + \varepsilon$$

Avec :

- $\mu$  la moyenne des temps de parcours
- *IQRNinf14* indicatrice valant 1 si l'indice IQRN de la section est inférieur à 14
- nb\_voies le nombre de voies
- matin et soir des indicatrices indiquant les périodes du matin et du soir
- sens(>Paris) une indicatrice valant 1 quand le sens de la voie considérée est vers Paris pour les radiales

- accidents : le nombre d'accidents observés pendant un an sur une section de 800m autour du point considéré à l'heure considérée et au jour de la semaine considéré, sur des jours ouvrés
- travaux : la présence de travaux au moins une fois sur la période de calcul de la distribution (on considère ici uniquement les gros travaux, à savoir des travaux impliquant le renouvellement d'une épaisseur de 3 à 8 cm de chaussée).