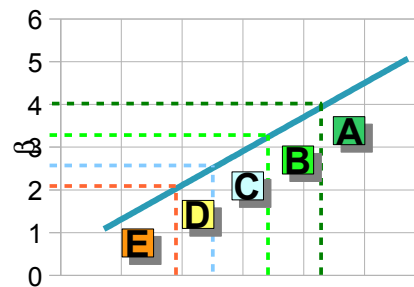
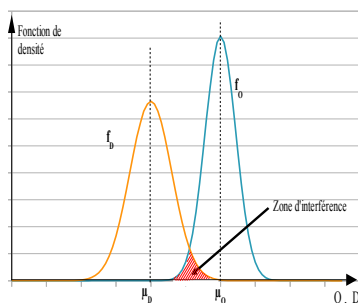
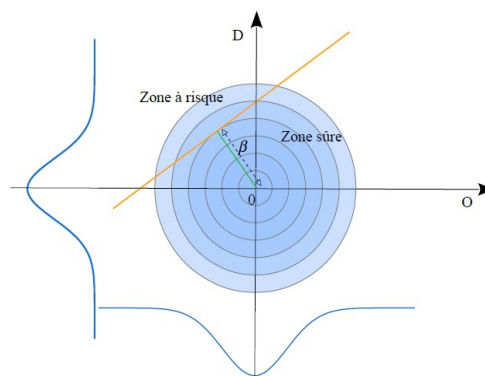
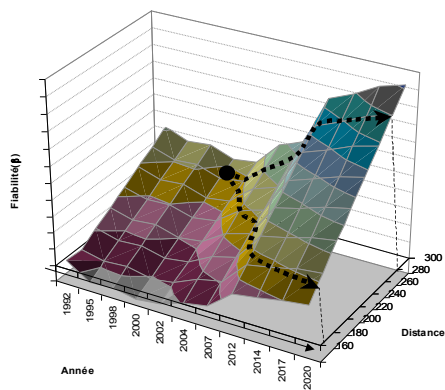


# Nouvelles modalités de définition des recommandations pour plus de flexibilité et de cohérence



# Nouvelles modalités de définition des recommandations pour plus de flexibilité et de cohérence

## Rapport

**date** : 12 février 2015

**auteur** : Lionel Patte, Cerema, Direction territoriale Méditerranée / DCEDI

**contribution** : Pascal Balmeffrézol, Cerema, Direction territoriale Centre-Est / DCAP

**résumé de l'étude** : Le présent rapport s'inscrit dans le cadre de l'action 4 de l'opération SERRES. Le but de cette action est d'identifier des solutions d'optimisation de la conception du système routier de façon à contribuer à la réduction des consommations d'énergie et aux émissions de gaz à effet de serre liées à l'utilisation future de ce système.

Le rapport traite des modalités de définition et d'élaboration des règles de l'art en matière de conception des infrastructures routières. Il s'appuie sur une analyse approfondie des règles de l'art et de leur logique, de leurs forces et de leurs faiblesses. Des exemples concrets attestent du caractère opérationnel des approches théoriques et générales développées.

La notion d'encadrement des valeurs est d'abord explorée. L'analyse montre que cette notion qui sert surtout à encadrer le comportement attendu de l'utilisateur, est déjà bien présente dans les recommandations actuelles, même si diverses améliorations formelles pourraient être apportées pour valoriser le principe. L'analyse conduit surtout à faire émerger le besoin d'évaluation *in itinere* fonctionnelle et comportementale. Un ensemble de limites à ne pas dépasser n'apporte pas forcément les garanties suffisantes d'atteindre les objectifs en matière de comportement des usagers. Si quelques processus de cette nature sont esquissés dans les « normes » actuelles, ils mériteraient d'être renforcés et étendus. Il ne faut pas négliger les gisements associés aux interactions entre les règles techniques relatives aux caractéristiques des infrastructures d'une part et les processus d'évaluation de la performance (dont les comportements) obtenue.

Surtout, l'utilisation d'approches probabilistes dans le cadre de la théorie de la fiabilité constitue une approche prometteuse, comme alternative aux approches déterministes. Elle devrait permettre de réduire les dimensions conventionnelles des règles actuelles, de cerner les marges de sécurité effectives qu'elles comportent, éviter certains surdimensionnements, mieux prendre en compte les aspects économiques et intégrer les conditions d'exploitation.

L'utilisation d'approches non conventionnelles suggère par ailleurs de définir plusieurs niveaux de performance ou, ce qui revient au même, plusieurs seuils, plutôt qu'un seuil unique et intangible. Les recommandations techniques pourraient alors définir un niveau de performance minimal à atteindre adapté selon la situation (niveau d'exposition au risque, le degré de contrainte économique, environnemental ou technique du projet...). Le rapport donne des orientations pour la définition de tels niveaux.

La révision des règles en matière de distance de visibilité en section courante sert d'illustration aux concepts que nous avons explorés. Les modèles probabilistes existant en la matière suggèrent que, dans les cas courants, il devrait être possible de relâcher sensiblement les contraintes en termes de distance de visibilité dite « sur obstacles » (de 20 à 25% environ), ainsi que certains paramètres qui en dépendent. De tels modèles permettent aussi de cerner le niveau de fiabilité d'un projet donné et peuvent servir à appuyer ou non la pertinence d'une dérogation.

Ces réflexions apportent les bases théoriques et méthodologiques pour réviser nombre de règles techniques parfois jugées intangibles. Elles devraient contribuer à apporter plus de flexibilité et de cohérence, améliorer la rentabilité socio-économique des projets, tout en donnant des garanties pour maîtriser la sécurité ou plus largement la performance des infrastructures aménagées.

**zone géographique** : sans objet

**nombre de pages** : 56

# SOMMAIRE

<b>1</b>	<b>Liminaire relatif à l’opération SERRES.....</b>	<b>5</b>
1.1	L’objectif de l’opération SERRES.....	5
1.2	L’objectif de l’action 4 – Optimisation de la conception du système routier.....	5
1.3	Méthode et démarche.....	5
1.4	Produits.....	8
<b>2</b>	<b>Présentation du rapport.....</b>	<b>10</b>
2.1	Introduction.....	10
2.2	Gisements.....	12
2.3	Objectifs.....	14
<b>3</b>	<b>Notion de « maximum » ou d’encadrement.....</b>	<b>15</b>
3.1	Présentation.....	15
3.2	Minimum ou maximum ?.....	16
3.3	Méthode.....	16
3.4	Analyse des documents de recommandations techniques.....	16
3.5	Évaluation a priori de la conception du projet.....	21
3.6	Conclusions.....	23
<b>4</b>	<b>D’une approche déterministe à une approche probabiliste.....</b>	<b>24</b>
4.1	Notion de règles et paramètres conventionnels.....	24
4.2	Avantages et inconvénients des approches conventionnelles.....	26
4.3	Les approches probabilistes.....	29
4.4	Cadre théorique.....	31
4.5	Introduction d’une vision dynamique.....	36
<b>5</b>	<b>Classes de performance multiples pour moduler les recommandations selon le contexte.....</b>	<b>38</b>
5.1	Problématique.....	38
5.2	Orientations.....	39
<b>6</b>	<b>Exemple de la distance de visibilité.....</b>	<b>44</b>
6.1	Présentation du modèle.....	44
6.2	Prise en compte de facteurs variables.....	46
6.3	Résultats.....	48
6.4	Niveaux de performance.....	50
<b>7</b>	<b>Conclusions et recommandations.....</b>	<b>51</b>

## Index des illustrations

Illustration 1: Rentabilité socio-économique et fiabilité.....	28
Illustration 2: Évaluation comportementale en théorie de la fiabilité, d'après [19].....	33
Illustration 3: Distribution de l'offre et de la demande; zone d'interférence.....	34
Illustration 4: Représentation géométrique de la fiabilité dans l'espace normé.....	35
Illustration 5 : modulation des niveau de performance en fonction des enjeux socio-techniques et des contraintes et implications du projet. ....	42
Illustration 6: Approche probabiliste - cas de la distance d'arrêt[29].....	45
Illustration 7: Simulation du taux de pénétration de l'ABS dans le parc VP. Evolution de 1980 à 2020 (Patte, 2014).....	50
Illustration 8: Evolution de la distribution des vitesses pratiquées sur autoroute de liaison (France entière) (ONISR).....	51
Illustration 9: Evolution de la fiabilité en matière de distance de visibilité sur obstacles (autoroutes de liaison).....	52
Illustration 10: Exemple de définition de niveaux de performance.....	53

# 1 Liminaire relatif à l'opération SERRES

## 1.1 L'objectif de l'opération SERRES

L'opération SERRES a pour ambition de produire des **recommandations et des solutions** permettant de limiter l'empreinte environnementale de la circulation routière à travers trois axes : l'exploitation des trafics par la gestion dynamique de l'espace routier (action 2), le comportement collectif par **l'optimisation de la conception du système routier** (action 4) et le comportement individuel par le développement de systèmes d'aide à la conduite écologique (action 5).

En parallèle et en support, elle a par ailleurs pour ambition d'améliorer les méthodes de mesure de la mobilité routière et des nuisances qui y sont associées (action 1), et de faire progresser les méthodologies d'analyse et d'évaluation des effets des projets d'aménagements routiers ou d'exploitation du trafic sur les impacts sociaux (sécurité et acceptabilité) et environnementaux de la circulation routière (action 3).

## 1.2 L'objectif de l'action 4 – Optimisation de la conception du système routier

Le but de l'action 4 est d'identifier des solutions d'optimisation de la conception du système routier de façon à contribuer à la réduction des consommations d'énergie et aux émissions de gaz à effet de serre liées à l'utilisation future – non à la conception même – de ce système. Il pourra ainsi s'agir d'imaginer des solutions de conception permettant de réduire l'empreinte environnementale liée à l'utilisation des voiries, y compris par l'utilisation d'aides à la conduite, mais également d'améliorer les conditions de circulation pour les différentes catégories d'usagers sans pour autant augmenter significativement la capacité globale pour la circulation automobile, ou encore de favoriser le report modal ou d'améliorer la compétitivité d'autres modes utilisant la route.

Les aides à la conduite sont appréhendées ici dans leur dimension et leur implication collectives et non individuelles. Il s'agit donc d'appréhender la possibilité et l'intérêt d'interaction entre l'infrastructure et ces systèmes d'assistance, en s'inscrivant dans une logique de « route automatisée », ou du moins de « circulation pilotée ». Les aides à la conduite sont plus particulièrement traitées au sein de l'action 4.2.

Le volet 4.1. traite des aspects conception : « **Nouvelles solutions pour une conception innovante des voiries** ».

Des travaux de nature à contribuer aux réflexions du groupe de travail « Route autrement pour une conduite apaisée (RACA) se trouvent au sein de l'action 4.1.

## 1.3 Méthode et démarche

La démarche couple analyses bibliographiques, une série d'entretiens avec spécialistes du domaine

routier et les connaissances de l'auteur.

Malgré le cadrage de la réflexion nous sommes confrontés à deux difficultés principales pour avancer dans le cadre de l'axe 4.1. D'abord, le champ de la réflexion reste particulièrement large que ce soit en termes de dysfonctionnements qui peuvent être générés (nuisances, gaz à effet de serre, insécurité, congestion...) que des composantes des infrastructures (géométrie, chaussées, assainissement, aménagements paysagers, écrans et équipements...). Le corollaire est qu'il faudrait *a priori* pouvoir mobiliser des compétences (spécialistes) et des informations sur ces différents aspects. L'autre difficulté est l'absence initiale de proposition concrète prometteuse (rentrant dans le cadrage initial de l'axe) dans des aspects qui font l'objet d'assez peu de travaux de recherche.

### 1.3.1 Démarche

Un travail préalable a été nécessaire pour identifier précisément les problématiques scientifiques, identifier les domaines ou sujets les plus prometteurs, définir une méthode d'étude *ad hoc*, et les compétences (et personnes) requises. Afin de cerner au mieux la problématique de façon pragmatique, avec des moyens restreints, le travail s'est appuyé conjointement sur :

- une analyse bibliographique, en s'appuyant sur des documents méthodologiques, documents de synthèse, en tenant compte des revues spécialisées, et de certains travaux de recherche ;
- une série d'entretiens en vis-à-vis avec un panel de spécialistes, d'experts ou de chercheurs dans des disciplines ou domaines représentant différentes composantes du système routier.

### 1.3.2 Notion de gisements

La notion de **gisements** est ici prise dans la même acception que celle utilisée dans le rapport dit Guyot « Gisements de sécurité routière » [1]; pour ce qui concerne la sécurité routière :

*« Mais qu'est-ce qu'un gisement de sécurité routière ? C'est le croisement d'enjeux illustrés par des circonstances, avec des actions spécifiques à mener pour améliorer la sécurité routière. »*

Il y a d'ailleurs des similitudes entre la démarche adoptée pour établir ce rapport et celle proposée ici. Mais, il convient de souligner que notre ambition est moindre pour trois raisons principales :

- (i) les thématiques sont plus larges touchant à la fois à l'environnement, l'ingénierie du trafic, la sécurité ;
- (ii) certaines problématiques sont plus récentes que la sécurité routière, et bénéficient de moins de travaux en lien avec les infrastructures ;
- (iii) les moyens de l'axe 4.1. sont nettement plus modestes que ceux dont a pu bénéficier le Préfet Guyot.

Le travail préalable avait en particulier pour objectif d'organiser une reconnaissance large des gisements avec, lorsque cela paraît possible, une première évaluation de leur potentiel.

L'analyse de la littérature suggère clairement que les gisements associés à chaque composante de l'infrastructure ou associés à chaque thème (gaz à effet de serre, pollution, bruit, fonctionnement...) sont souvent réduits ou laissent difficilement espérer des solutions présentant une bonne rentabilité économique. Aussi, la Conférence Européenne des Ministres des Transports [2] préconise **de donner une priorité aux mesures qui produisent des effets bénéfiques conjoints**, sans pour autant négliger

leur rapport coût-efficacité.

C'est aussi ce qui ressort des travaux australiens [3]. L'analyse de 47 solutions de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur des transports dans divers registres (technologies des véhicules et carburants, réglementation, signaux de prix, transport urbain, infrastructures, transports de marchandises...) et pour les divers modes (routier, ferroviaire, aérien...). Les solutions de réduction qui présentent le plus grand potentiel sont liées aux technologies des carburants et des véhicules (amélioration des performances des carburants pour moteurs à combustion interne, électrification des véhicules, utilisation des biocarburants de deuxième génération). Inversement, les solutions évaluées relatives aux infrastructures (aménagement, gestion) présentent un potentiel nettement moins élevées. Les mesures en matière d'aménagement des infrastructures que les auteurs (chercheurs, ingénieurs) ont jugé pertinent d'évaluer sont relatives aux chaussées (conception, uni, matériaux).

La référence nuance néanmoins le propos en suggérant que les solutions entraînant une faible réduction des émissions peuvent être intéressantes **grâce aux bénéfices conjoints** qu'elles apportent (qualité de l'air, réduction du coût des transports, qualité de vie, sécurité routière, procédures et des conceptions d'infrastructures...). Ce commentaire suggère d'évaluer le bénéfice net global. L'article identifie également les principaux obstacles à l'adoption des mesures, dont certains sont parfaitement adaptés pour apprécier l'opportunité des solutions en matière d'infrastructures :

- politique publique : limitation des fonds publics, ampleur des changements nécessaires,
- aspects sociaux et culturels : attentes en matière de mobilité et d'accès, acceptation et appropriation des technologies...
- aspects économiques : aversion générale pour les coûts initiaux supplémentaires nécessaires, coûts des changements d'infrastructures, retours sur investissements reportés sur d'autres acteurs que ceux engageant l'investissement...

Quoi qu'il en soit, la conception ou l'aménagement d'une infrastructure (ou d'un réseau) implique de prendre en compte l'ensemble des enjeux et contraintes, et il s'avère en pratique délicat d'arbitrer en faveur de l'un au détriment de l'autre.

Enfin, il semble qu'une nouvelle conception (ou une conception innovante) des infrastructures routières ne saurait se réduire à agréger ou réunir les innovations techniques ou technologiques, imaginées ou déjà mises au point dans différents domaines. Une telle démarche ne donne guère des gages de cohérence ou de pertinence. Pour cela, il existe de nombreuses conditions à réunir. Une **synergie entre les mesures** (dispositions constructives, équipements...) semble nécessaire.

### 1.3.3 Contributions

Ce programme intègre les contributions en 2013 du Cete de l'Ouest (DIREM) dans le cadre du thème « P3 », du Cete de Lyon/DCAP dans le cadre du thème « P4 ». Il s'appuie aussi sur plusieurs documents transmis par le Cete Normandie-Centre (PCI AE2MC), ainsi que sur des références indiquées par les personnes interviewées en 2011.

Sur la base du rapport d'étape sur les pistes de travail de 2011 du Cete Méditerranée, plusieurs travaux d'approfondissement ou d'exploration des pistes de travail sont définis.

## 1.4 Produits

Le rapport « Enjeux et gisements » [4] élaboré dans le cadre de l'axe 4.1. de l'opération SERRES, permet notamment de rappeler et de qualifier les enjeux, en relation avec l'objet et les objectifs de l'opération SERRES puis de cerner les gisements associés.

Au-delà des gisements dans différents domaines, apparaissent des **verrous d'exploitation** transversaux. Ces verrous renvoient notamment à deux aspects de nature différente :

- à la structure et aux principes associés à l'élaboration des recommandations techniques en matière de conception routière. Il paraît en effet délicat de modifier substantiellement les pratiques en matière d'aménagement sans revenir sur certains des principes à l'origine des règles de l'art, compte tenu de la cohérence intrinsèque du corpus actuel et au conservatisme que cela induit ou fait apparaître.
- à la difficulté de maîtriser sur les voies non urbaines, autrement que par un contrôle systématique (CSA...), les vitesses pratiquées par l'usager, et plus précisément d'homogénéiser les vitesses entre les usagers d'une part, et sur une section d'autre part. Cela implique de limiter en fréquence et en ampleur les phases d'accélération et donc de décélération. Si multiplier les phases d'arrêt ou de ralentissement fort sur la voie permet de rythmer le parcours et concourt à abaisser les vitesses moyennes, cela ne permet pas forcément de réduire les émissions de polluants et de gaz à effet de serre, et peut même avoir des effets négatifs dans ce domaine.

D'une part, ces thèmes font généralement déjà l'objet de travaux spécifiques, mobilisant des moyens techniques et des compétences idoines. Par exemple, les revêtements routiers pour les enjeux concernant SERRES (réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, sécurité...), font l'objet de l'opération de recherche ECOSURF (Etude Contact pneumatique chaussée pour des propriétés Optimales et durables des SURfaces routières). D'une façon générale, l'axe 4 de SERRES s'intéresse à l'infrastructure prise dans son ensemble, même s'il s'agit de n'intervenir que sur certains aspects. C'est l'approche privilégiée en matière de conception/aménagement, que ce soit dans le cadre de projets concrets, de méthodologie ou de la recherche.

A la suite de ce rapport, un document de cadrage [4] propose plusieurs pistes de travail qu'il paraît intéressant d'explorer et d'approfondir. Pour la définition de ces pistes de travail, nous avons privilégié des approches globales ou transversales, plutôt que des thèmes très ciblés – associés à une composante de l'infrastructure (chaussée...) ou à un enjeu particulier.

Le document comporte des éléments de cadrage concernant plusieurs pistes de travail concrètes et de nature à répondre aux objectifs fixés à SERRES. Chacune fait l'objet d'un chapitre dans lequel sont exposés les principales motivations, la nature des gains attendus, directs ou indirects, puis une esquisse de déroulement du travail et des éléments à produire, les objectifs concrets visés (livrables), les principales modalités pour y parvenir ainsi que des indications de coût et de calendrier.

Quatre pistes de travail, associées à un ou plusieurs des gisements (...) sont plus particulièrement identifiées :

- **[P1] Une typologie routière réformée et élargie**
- **[P2] Nouveau type de route : voies périurbaines à 70 km/h.** Cette piste ne sera finalement pas traitée dans le cadre de SERRES, faisant l'objet de travaux du Certu (direction technique Ville, mobilité, territoire).
- **[P3] Transposer et adapter les outils de modération de la vitesse au milieu péri/interurbain.**



- **[P4] Nouvelles modalités de définition des recommandations pour plus de flexibilité ou de cohérence.**

Cette liste n'est évidemment pas limitative et encore moins exhaustive. D'autres pistes auraient pu être imaginées et décrites, par exemple :

- Échangeurs : accroître la capacité au droit des entrées (voire des sorties) en optimisant l'occupation des voies (géométrie, signalisation dynamique, systèmes coopératifs);
- Route automatisée (cf. LaRA pour La route automatisée<sup>1</sup>).

---

1 <http://www.lara.prd.fr>

## 2 Présentation du rapport

### 2.1 Introduction

**Les règles de l'art** en matière de conception routière constituent **une garantie de qualité**, notamment en matière de niveau de service et de sécurité des usagers de la route comme des agents d'exploitation, ainsi qu'un socle commun pour garantir l'homogénéité des pratiques.

**Elles constituent également des contraintes** qui ont des impacts techniques, économiques et environnementaux. En particulier, elles fixent – ou plutôt recommandent – des limites à ne pas dépasser : minima (rayons du tracé en plan ou du profil en long, distances de visibilité, largeur des composantes du profil en travers...) ou des maxima (déclivités, dévers...). Les recommandations techniques peuvent prendre diverses formes, mais celles qui comportent des limites (seuils) à ne pas dépasser sont perçues, à tort ou à raison, comme étant les plus contraignantes.

Les paramètres de conception ont **une influence directe et significative sur les dysfonctionnements** liés à l'utilisation de la route en matière de sécurité routière, de confort et, pour certains d'entre eux, de condition de circulation, autrement dit de niveau de service *lato sensu* pour les usagers de la route (différents modes). D'ailleurs, les principales justifications de la grande majorité des recommandations techniques relèvent de ces registres – et en premier lieu la sécurité. Aussi, toute modification des recommandations techniques est susceptible d'avoir un impact, positif ou non, sur ce niveau de service. De manière indirecte, mais potentiellement très significative, les conditions de circulation d'une catégorie d'usagers influent sur l'attractivité du mode de transport associé, et peuvent avoir une influence sur le choix modal (transports collectifs, deux-roues, véhicule particulier...). Dans ce domaine, l'appréciation de l'attractivité est néanmoins d'abord liée aux conditions d'exploitation – pour autant que l'on puisse distinguer exploitation et aménagement d'une voie.

En matière d'**impacts environnementaux**, il existe des liens avec la configuration de la route, mais ils sont globalement moins directs, certains et évidents. En la matière, on peut distinguer :

- les impacts liés à l'aménagement de l'infrastructure, sa présence physique, notamment des effets de coupure et d'emprise (milieu naturel, agriculture, paysage...). Ces impacts, généralement permanents et irréversibles, sont fonctions de la position de l'axe du tracé, mais aussi de la largeur de l'assiette de l'infrastructure et, à ce titre, des terrassements ; et donc du profil en long comme du tracé en plan (et dans une moindre mesure du profil en travers type) ;
- les impacts liés à l'utilisation de l'infrastructure. Les paramètres de conception n'ont pas, en première approche, une influence directe et majeure sur les dysfonctionnements liés à l'utilisation de la route. Certes, la pente du profil en long impacte sensiblement la consommation et les émissions, mais les règles de l'art ne fixent qu'un maximum...

Diverses considérations liées **au changement de contexte** (outre les aspects sociétaux intégrés *de facto* dans l'objet même de l'opération SERRES) sont à prendre en compte :

- le changement du profil ou d'aptitude supposé des conducteurs et singulièrement le

vieillessement de la population.<sup>2</sup>

- les changements de comportements récents (au cours des douze dernières années) sont sans doute plus tangibles. La baisse globale des vitesses (environ - 10 km/h en moyenne depuis 2002 [5]) notamment sur les voies rurales, en relation avec le déploiement du contrôle automatisé, peut conduire à penser que les marges de sécurité offertes par les recommandations techniques (notamment l'ARP [6]), autrefois nécessaires, ne le sont plus forcément autant ;
- l'amélioration globale des techniques, et en particulier les performances des véhicules, mais aussi l'amélioration des techniques et procédés routiers ;
- les exigences formulées vis-à-vis des « normes » routières, de réussir la gageure d'être à la fois plus flexible, moins contraignante, tout en continuant de garantir un niveau de qualité des infrastructures.

L'analyse des règles de l'art réalisée dans SERRES [4] explique la manière dont elles sont définies, leur forme, les logiques sous-jacentes. Elle met en exergue leurs points forts et leurs points faibles ou limites ; elle suggère aussi des leviers.

- Les règles de l'art en matière de conception géométrique sont associées majoritairement à des **préoccupations de sécurité routière**. Modifier de telles règles est de nature à soulever des difficultés et des réticences – on imagine difficilement remettre en cause cet objectif *a fortiori* dans le cadre de SERRES. Aussi, faudrait-il être capable de montrer que les modifications soit vont dans le sens d'un renforcement de la sécurité ou du moins ne sont pas de nature à la dégrader, soit sont accompagnées de mesures compensatoires ou palliatives réellement adaptées et suffisantes.
- **La justification des règles de l'art** dans le domaine de l'aménagement des infrastructures routières est une question récurrente et importante. Ce questionnement atteste de l'interpellation croissante des règles, des spécialistes du sujet et de l'insuffisance de partage des informations. Les règles de conception sont souvent (et légitimement) critiquées ; parfois caricaturées faute d'être vraiment connues ou maîtrisées ; D'ailleurs, il convient de se demander si, parfois, les critiques ne visent pas davantage leur application que la règle elle-même. Le questionnement renvoie également à la difficulté grandissante de trouver des compromis satisfaisants entre les multiples contraintes auxquelles sont confrontés les aménageurs. Ils témoignent aussi de l'absence de démarche d'évaluation des mesures proposées et mises en œuvre.
- **Des méthodes et des cadres différents** pour définir les principes et les règles de conception. Pour modifier les règles de conception – élément de contrainte mais aussi de support des pratiques d'aménagement – si tel est le besoin, il paraît nécessaire d'introduire au-delà des concepts mêmes (route autrement, route durable...), des méthodes différentes, sans renier pour autant les connaissances et les savoir faire acquis qui ont fait leur preuve. Modifier la manière de fixer des règles à partir des connaissances, en remettant par exemple en question la notion de valeurs conventionnelles en fait partie.

2 Il est néanmoins difficile d'en tirer des enseignements concrets et facilement exploitables dans notre cadre. Ce vieillissement, s'il est incontestable, s'avère particulièrement lent par rapport à d'autres évolutions (technologiques, sociétales, économiques...). Il n'introduit pas de problématique résolument nouvelle : la part des personnes âgées, usagers de la route (conducteur, piéton...) est déjà importante ; elle va augmenter, mais pas changer d'ordre de grandeur à moyen terme en France

## 2.2 Gisements

La notion de gisements est présentée au chapitre 1.

Les principaux gisements liés aux recommandations techniques en matière de conception apparaissent comme suit :

### ■ **une réduction des nuisances**

Certains impacts relatifs à l'utilisation de la voirie sont liés à la distance entre l'infrastructure et les zones à enjeu (bâtiments habités...) et donc à son tracé. Il s'agit notamment, mais pas uniquement, des nuisances sonores, de la pollution atmosphérique, de problèmes de co-visibilité... Des contraintes plus ou moins fortes dans la détermination des caractéristiques de l'infrastructure (tracé en plan, profil en long... de la chaussée principale comme des points d'échange et voies connexes) pourront avoir des implications très sensibles sur la position relative des l'infrastructure et de secteurs à enjeu, conditionnant en partie le niveau des nuisances.

Le point précédent mérite d'être quelque peu nuancé, compte tenu de l'existence d'un effet d'écrêtement induit par les dispositions réglementaires. Ainsi dans un cadre réglementaire déjà contraignant, l'apparition de possibilités nouvelles conduit moins à réduire le niveau de nuisances (par exemple de bruit) que de réduire les impacts connexes (économiques ou paysager). Des revêtements réduisant fortement et durablement les émissions (littéralement « à la source ») et permettront d'éviter ou réduire des mesures au niveau de la propagation (écrans). *In fine*, le niveau de bruit mesuré en façade ne sera pas forcément moins élevé. La situation est différente pour l'aménagement des routes existantes.

### ■ **un gain significatif mais indirect peut être observé au niveau de la vitesse (modération)**

Il existe des liens complexes, mais tangibles et significatifs entre, d'une part, les conditions d'aménagement de la route et de son environnement immédiat et, d'autre part, les vitesses pratiquées par les usagers, notamment les automobilistes. Une modération des vitesses par un abaissement ou plutôt par un écrêtement du niveau de confort pourrait conduire à réduire les nuisances de l'utilisation de la route, avec en outre une implication possible sur les vitesses pratiquées lorsque les caractéristiques offrent un confort quelque peu superflu. Des caractéristiques géométriques jugées trop généreuses sont susceptibles d'accroître les vitesses avec les implications négatives que cela comporte. De telles caractéristiques géométriques découlent de l'application de certaines recommandations [6], sinon de leur interprétation.<sup>3</sup>

### ■ **éviter ou limitation des phases de décélération/accélération**

Les recommandations et les modes d'aménagement des voies imposent des phases de décélération/accélération, facteurs de sur-émissions et de surconsommation. Le cas des barrières de péage a été récemment médiatisé et a servi d'argument à l'intégration de leur aménagement (péage sans arrêt) dans le *Paquet vert autoroutier*.<sup>4</sup> Sur les voies non autoroutières, d'autres aménagements plus fréquents, conduisent à des ralentissements importants voire des arrêts : notamment les carrefours avec perte de priorité (giratoires, carrefours à feux...).

### ■ **réduction des impacts permanents et irréversibles liés à la réalisation ou l'aménagement**

Un effet positif collatéral très significatif et direct concerne la réduction des impacts permanents et

3 Il existe un lien fort entre les vitesses pratiquées et certains paramètres de conception (rayon, pente, largeur essentiellement), rejoignant ainsi (du moins potentiellement) les problématiques de maîtrise des vitesses.

4 Cela permet une baisse maximale théorique de 5 % de la variation de l'énergie cinétique (PKE pour *Positive Kinetic Energy*) pour la part des VP concernés et pour les situations en circulation libre.

irréversibles liés à la réalisation ou l'aménagement de l'infrastructure : limitation des emprises disponibles, réduction des terrassements en permettant de mieux « coller au terrain », etc. Assouplir certaines règles très contraignantes permettrait, dans le cadre de l'élaboration des projets de donner davantage de souplesse à l'aménageur pour trouver une solution optimale aux multiples objectifs et contraintes auxquels il est soumis – y compris les contraintes économiques. Si ce sujet représente un enjeu fort pour les nouvelles infrastructures (tracé dit « neuf ») et un gisement global très significatif pour la réduction de leurs impacts, il peut sembler en première approche que l'on soit en dehors du cadre des objectifs de SERRES (cf. chap. 1). En effet, les gisements vont concerner d'abord l'impact des travaux et de la présence physique de la voie plus que de l'utilisation ultérieure de la voirie. Mais, ce sera négliger les aspects systémiques. Par exemple les règles de conception (qui ont des impacts en phase construction) sont liées à des préoccupations de maîtrise des risques routiers liés aux conditions d'usage de la future infrastructure.

#### ■ **Une meilleure rentabilité socio-économique**

Les préoccupations de rentabilité socio-économique (intégrant les aspects environnementaux) sont intégrées dans le cadre des projets d'infrastructures. Ces préoccupations sont aussi présentes dans le cadre des référentiels techniques en matière de conception, mais de manière très souvent implicite. En tout état de cause, le niveau d'aménagement tendant vers un optimum économique ne saurait être le même pour tous les projets, compte tenu des contextes diversifiés dans lesquels ils s'inscrivent. Dans certains cas, de plus en plus fréquents, il s'agit d'une optimisation sous contrainte incontournable (en relation avec des aspects budgétaires, ou réglementaires). Une flexibilité plus grande des règles de l'art, et surtout son accompagnement garantissant un usage pertinent et un niveau acceptable en matière de performance et sécurité s'inscrit dans cette logique.

#### ■ **faciliter la déclinaison des politiques techniques**

Les politiques techniques tendent à chercher des compromis entre diverses préoccupations liées aux enjeux sociétaux, à l'intérêt public (environnement, sécurité routière, mobilité...). La forme des recommandations techniques, ou les principes adoptés pour leur élaboration peuvent limiter les possibilités d'expression de ces politiques, les marges de manœuvre disponibles... En effet, les recommandations techniques en France sont très opérationnelles, très intégrées, avec des considérations souvent implicites, notamment sur les niveaux de sécurité et parfois niveaux de services offerts. Sans préjuger de la hiérarchie des enjeux ou des préoccupations à privilégier qui n'est pas de notre ressort – elle ne l'est pas forcément non plus des recommandations techniques en matière de conception et de ceux qui les élaborent –, il s'agirait de faciliter ses arbitrages par les personnes idoines (ceux qui ont la responsabilité de définir les politiques techniques sur un réseau routier donné, en toute connaissance de cause.

#### ■ **Favoriser l'expression de nouveaux concepts et démarches**

La démarche s'inscrit globalement dans une réflexion sur les verrous d'exploitation à la mise en œuvre de nouveaux concepts et démarches (comme « RACA » [7]). Relâcher les contraintes dans certains domaines de la conception peut servir globalement à l'élaboration de nouvelles recommandations, voire à un nouveau paradigme en matière de conception routière.

Encore au-delà, il s'agit également de « **désacraliser** » les règles. On ne signifie pas par là, qu'il s'agit de réduire l'importance à apporter à la qualité technique des projets, mais plutôt qu'il s'agit de **responsabiliser** davantage les aménageurs, comme les personnes chargées du contrôle des projets.

## 2.3 Objectifs

Les objectifs concrets que l'on peut dégager pour la définition de nouvelles modalités d'élaboration des recommandations techniques en matière de conception sont les suivants :

- donner davantage de souplesse à l'aménageur/concepteur pour trouver une solution optimale aux multiples objectifs et contraintes auxquels il est soumis, tout en préservant les garanties, en matière de sécurité notamment ;
- favoriser la maîtrise des vitesses en donnant la possibilité de rendre les caractéristiques des infrastructures compatibles avec l'objectif de réduction ou maîtrise des vitesses ; par un abaissement du niveau de confort – ou plutôt par un écrêtement de ce niveau ;
- développer une méthode pour définir des recommandations techniques offrant davantage de garantie d'optimum socio-économique.

En pratique, il s'agit notamment **d'introduire de nouveaux concepts** (comme l'encadrement de valeurs, les seuils multiples...) en se basant sur un *benchmark* international, et **de modifier les principes** de définition des recommandations techniques en matière d'aménagement des infrastructures routières ou autoroutières répondant aux enjeux actuels des aménageurs. Il s'agit aussi de permettre des changements significatifs et effectifs dans les caractéristiques géométriques des projets.

**Le potentiel de développement** de ces concepts sera dans un second temps évalué.

## 3 Notion de « maximum » ou d'encadrement

### 3.1 Présentation

L'idée initiale se base sur le sentiment que les règles de conception définissent des valeurs minimales à ne pas dépasser – garantissant en cela un niveau de confort minimum et évitant certains problèmes de sécurité – mais ne donnent pas de cadre pour empêcher l'usage de valeurs trop importantes. Des valeurs élevées sont suspectées d'être à l'origine d'un niveau de confort excessif de nature à provoquer des vitesses pratiquées exagérément élevées, ou du moins de développer des attentes chez le conducteur qui ne serait pas en rapport avec la fonction de la voie. Ce sentiment est largement favorisé par la notion de catégorie très présente dans les recommandations techniques, et en premier lieu l'ARP.

*Dans l'acception des recommandations techniques, la catégorie est une subdivision d'un type de route, conditionnant essentiellement les caractéristiques géométriques du tracé.<sup>5</sup> A l'intérieur de chaque type de route, la catégorie de route fixe les principales caractéristiques du tracé (tracé en plan et profil en long). La catégorie est associée à une vitesse de conception, appelée vitesse de référence en France, design speed dans la littérature anglo-saxonne... La catégorie de route est en fait une catégorie de tracé, définie au sein d'un type de route donné. Par exemple, l'ARP considère deux catégories (et des routes en relief difficile). À chaque catégorie est attachée une "vitesse de référence", paramètre conventionnel de calcul, 60 et 80 km/h respectivement pour R60 et R80.*

Dans ce cadre, le tracé en plan (et les rayons horizontaux) constitue l'exemple généralement évoqué. Il est généralement constaté qu'il existe dans les recommandations des rayons minima mais pas de rayons maxima, et conjointement que les infrastructures routières rurales comportent souvent des rayons en plan trop grands.

On verra par la suite que cette appréciation concernant les recommandations techniques est, sinon erronée, du moins assez largement biaisée (y compris pour le cas des rayons en plan). Néanmoins, elle conduit à questionner les recommandations techniques, la manière de les définir, d'éprouver les principes sous-jacents et donne des pistes pour orienter la réflexion.

Il s'agirait donc de préciser un niveau maximal de confort (ou de niveau de service), en complément des règles fixant généralement un niveau minimum de confort qui est le principe sous-jacent à la notion de catégorie.

Une autre façon de formuler le principe renvoie à l'idée d'**encadrement des valeurs** des paramètres de conception devrait conduire à un encadrement des comportements des usagers, notamment en matière de vitesse pratiquée.

On pourra objecter que cette approche limitée à la géométrie, néglige la prise en compte de la multitude et des inter-relations entre éléments de conception (paysage, perception...) et d'une façon générale ne s'applique qu'à certains aspects de l'infrastructure.

5 Cette définition correspond au (b) de la définition de catégorie du dictionnaire de l'AIPCR : « Classification d'une route au sein d'un réseau selon a) les types définis par l'administration responsable de sa construction, de son entretien et/ou de son exploitation, b) les normes de construction ou c) les catégories d'usagers autorisées à l'utiliser. »

## 3.2 Minimum ou maximum ?

Intuitivement, le confort est une notion croissante des paramètres de conception ou descripteur de l'infrastructure qu'il s'agisse de rayons horizontaux et verticaux, de dévers ou pente transversale de la chaussée, de longueur d'alignement droit, de largeur de voie... La règle de conception indique alors souvent un minimum recommandé pour ce paramètre : un rayon minimum en plan, un rayon minimum en angle saillant, etc.

Mais ce n'est pas forcément le cas. Le confort ou niveau de service peut être une fonction décroissante du paramètre de conception. C'est typiquement le cas des pentes longitudinales ; des pentes maximales sont ainsi définies. Aussi, la notion de minimum ou de maximum est approximative ou contextuelle.

En pratique, fixer un maximum quand un minimum existe – ou le contraire – revient à **encadrer** le paramètre/le descripteur.

## 3.3 Méthode

Les éléments qui suivent sont élaborés à partir d'une analyse menée en 2013 par Pascal Balmeffrezol (Cerema/direction territoriale Centre-Est) de documents de recommandations français et d'un document de recommandation anglais. Les documents français sont notamment l'ICTAAL [8], l'ARP [6] et l'ICTAVRU [9], et ont fait l'objet d'une lecture intégrale pour les deux premiers et d'une lecture plus partielle pour le dernier. Le document anglais « *Design Manual Road and Bridges* » [10] a lui aussi fait l'objet d'une lecture intégrale.

Pour chaque document, les principaux paramètres ou éléments de conception dont la valeur est bornée ou imposée ont été relevés.

L'analyse s'est ensuite poursuivie par l'identification d'une série de réflexions ou d'idées en rapport avec la thématique de l'action 4.1.

## 3.4 Analyse des documents de recommandations techniques

### 3.4.1 ICTAAL

L'ICTAAL est l'instruction sur les conditions techniques d'aménagement des autoroutes de Liaison. L'instruction a été diffusée par circulaire en 2000. Les paramètres dont les valeurs font l'objet de bornes sont les suivants :

- Le nombre de voies : il existe des plages de trafic à la trentième heure (en uvp/h) qui détermine le nombre de voies suivant lequel il convient de dimensionner l'autoroute.
- Les règles d'enchaînement des virages dont le rayon est inférieur à  $1,5 \times R_{nd}$  (rayon non déversé) : ces virages doivent être encadrés par des courbes dont le rayon est borné à 1,5 fois la valeur du rayon faible. Pour les bretelles des points d'échange des règles similaires existent avec des valeurs éventuellement différentes.
- Les valeurs de longueur des raccordements progressifs (clothoïdes) sont déterminées par une formule en fonction de la valeur du rayon raccordé et de la variation de dévers.



- Les différentes parties du profil en travers sont définies en largeur, éventuellement avec plusieurs valeurs possibles mais sans que les valeurs intermédiaires soient utilisables.
  - La largeur des voies vaut 3,50m sauf pour le cas des autoroutes à trafic modéré pour lesquelles, la largeur de la voie de gauche vaut 3m.
  - Ainsi, la bande dérasée de gauche (BDG) vaut 1m et dans des cas particulier 0,50m ou 0,75.
  - La bande d'arrêt d'urgence BAU vaut 2,5m ou 3m en fonction du nombre de poids lourds circulant sur la section (seuil à 2000PL/J deux sens confondus)
  - la zone de sécurité a une largeur fixe qui est fonction de la catégorie de voie et donc de la vitesse de conception (10m pour la catégorie L1 et 8,50m pour la catégorie L2).
  - Le dévers de la chaussée est défini en fonction de la valeur du rayon. Sa valeur est bornée. Il n'y a pas de latitude pour les concepteurs quant à la définition de la valeur du dévers.
- Les valeurs des déclivités du profil en long sont bornées. Elles sont plafonnées à 5% pour la catégorie L1 et à 6% pour la catégorie L2. Par ailleurs, un objectif fort de résultat existe en matière d'écoulement des eaux et qui conduit à éviter d'utiliser des valeurs de pentes faibles (<0,5%) sauf à s'assurer de la bonne évacuation des eaux avec la prise en compte des dévers.
- Les valeurs de dimensionnement des biseaux d'entrée et de sortie des dispositifs d'insertion ou de déboîtement sont fixées sans qu'il y ait de latitude pour les concevoir différemment.

### 3.4.2 ARP

L'Aménagement des Routes Principales est une instruction annexée à la circulaire du 5 août 1994 de la direction des routes. L'ARP s'applique pour l'État aux routes principales, c'est-à-dire les routes structurantes au niveau national ou plus local, et qui supporte généralement un trafic supérieur à 1500 véh/j. Deux types de routes sont décrits dans ce document, les routes multifonctionnelle de type R et les route dites « express » de type T. Le type T n'est plus utilisé et le reste du texte ci-dessous ne concerne donc que les routes de type R.

- Les paramètres principaux dont les valeurs font l'objet de bornes sont les suivants. Il faut noter que des latitudes assez importantes existe dans le cadre de l'aménagement de l'existant.
- Les différentes parties du profil en travers sont définies en largeur :
  - la largeur des voies vaut 3,50m sauf pour le cas des aménagements de l'existant ou des routes en relief difficile, pour lesquelles la largeur peut être réduite jusqu'à 3m.
  - l'accotement est composé d'une zone de récupération stabilisée ou revêtue et d'une zone de sécurité. La zone de récupération a une largeur comprise entre 1,75 m et 2 m selon qu'il s'agit d'un aménagement neuf ou de l'existant. En relief difficile, la largeur peut être très réduite. La zone de sécurité a une largeur de 4m pour l'existant, de 7m pour les voies à 90km/h et de 8,50 pour les routes à 110km/h.
  - la bande dérasée de gauche éventuelle (BDG) vaut 1m et dans des cas particuliers 0,50m.
  - le dévers de la chaussée est défini en fonction de la valeur du rayon. Sa valeur est

bornée. Il n'y a pas de latitude pour les concepteurs quant à la définition de la valeur du dévers.

- Les règles d'enchaînement des rayons de valeur inférieure à 500m : ces rayons doivent être encadrés par des rayons dont la valeur est bornée entre 0,67 et 1,5 fois la valeur du rayon faible.
- Les valeurs de longueur des raccordements progressifs (clothoïdes) sont déterminées par une formule en fonction de la valeur du rayon raccordé et de la largeur de la chaussée.
- Les valeurs des déclivités du profil en long sont bornées. Elles sont plafonnées à 7% pour la catégorie R60 et à 6% pour la catégorie R80. Par ailleurs, un objectif fort de résultat existe en matière d'écoulement des eaux et qui conduit à éviter d'utiliser des valeurs de pentes faibles (<0,5%) sauf à s'assurer de la bonne évacuation des eaux avec la prise en compte des dévers.

L'ARP contient une préconisation intéressante et qui paraît aller dans le sens d'une optimisation de la conception des projets. En effet, l'ARP prévoit une démarche itérative de conception passant par les étapes suivantes :

- définition des caractéristiques géométriques de la voie à partir de données d'entrées fixées (type et catégorie de voie, nombre de voie, type d'échanges, ...),
- estimation de la V85 sur le projet à partir du logiciel DIAVI qui estime les vitesses pratiquées et la visibilité à partir de la géométrie du projet.
- adaptation des caractéristiques du projet pour éviter des défauts de visibilité ou éviter des comportements en vitesse inappropriés.

Il s'agit d'une démarche d'évaluation du comportement des usagers par rapport au projet conçu.

### 3.4.3 DMRB

Le *Design Manual for Roads and Bridges TD 9/93* (DMRB) traite dans son volume 6 de la géométrie routière des routes principales (*Trunk roads*) du Royaume-Uni. La version examinée est la version datée de février 2002.

Dans un premier temps un aperçu de la démarche générale de conception est donnée. Ensuite, il sera pointé quelques spécificités ou similarités d'approche avec les documents français.

Ce document insiste sur le caractère de valeur minimale souhaitable des recommandations formulées, permettant de satisfaire un niveau acceptable de sécurité. Il ne s'agit pas de minimaux absolus ou de valeurs fixées. Une grande place est laissée à l'optimisation du projet en vue de maximiser le rapport coûts/bénéfices selon une méthode définie (COBA). Il existe des possibilités de se situer une « marche » en dessous de ces valeurs en termes de vitesse de conception dès lors que cela permet d'optimiser le projet du point de vue économique ou environnemental ; voire de déroger aux valeurs mentionnées.

La vitesse de conception est modérée en fonction de la « contrainte d'alignement » Ac (fonction de la sinuosité du tracé et du fait que la voie soit à chaussées séparées ou pas), d'une contrainte de projet Lc (fonction des largeurs de profils en travers disponibles et de la fréquence des carrefours ou échanges) et enfin de la vitesse réglementaire imposée sur la voie.

Pour les voies neuves, le principe de détermination de la vitesse de conception repose sur une première esquisse de la géométrie à partir de laquelle la vitesse de conception est évaluée après détermination de Ac et Lc pour des tronçons de route > 2km. La géométrie peut alors être adaptée

par itération du calcul de la vitesse de conception afin d'optimiser le projet y compris sur les plans économiques ou environnementaux.

Pour les aménagements de l'existant, la démarche est similaire, en revanche les souplesses de conception offertes sont plus importantes pour éviter des écarts de caractéristiques trop importants au sein d'un même itinéraire, sauf si le projet relève d'une amélioration progressive de l'ensemble de l'itinéraire.

En urbain, la vitesse minimale sur les voies primaires (du réseau principal) est de 70 km/h. La vitesse de conception doit être aussi proche que possible de la vitesse autorisée afin d'éviter des vitesses excessives.

À partir de la vitesse de conception, les différents paramètres sont définis, ainsi que pour chacun d'entre eux, le niveau de dégradation possible du paramètre (un cran ou deux de vitesse de conception en deçà de la valeur souhaitable)<sup>6</sup>.

Il est prévu deux niveaux de souplesses :

- les détentés ou relâchement des valeurs des paramètres par rapport aux valeurs souhaitées, qui sont à l'initiative du concepteur. Ces relâchements ne sont pas tous cumulatifs et sont encadrés (limités au niveau de points singuliers par exemple).
- Les dérogations (*departures*). Elles sont instruites formellement par le service superviseur.

Les valeurs des différents paramètres sont *a priori* fixées de façon discrète en association avec la vitesse de conception. Il ne semble pas explicitement prévu que certains paramètres puissent prendre des valeurs continues entre les différentes valeurs indiquées.

La distance de visibilité est mesurée pour un œil du conducteur compris entre 1,05 m et 2 m de haut sur une cible entre 0,26 m et 2 m au-dessus du sol.

Les valeurs de dévers sont bornées (7 % en interurbain et 5 % en urbain).

Le document relève qu'en milieu urbain, les demandes d'adaptations de la voie à son contexte seront la plupart du temps prédominantes par rapport à toute autre considérations de coordination des différents paramètres entre eux.

Pour les routes bidirectionnelles, on relève qu'il est souvent inapproprié de mettre en œuvre des grands rayons en plan et en long, car ils conduisent à des comportements inappropriés, à des difficultés de dépassement et à des coûts importants. Le document prévoit donc de borner les valeurs des rayons en fonction de la vitesse de conception et donc de définir des plages de valeurs utilisables en fonction de la vitesse de conception et de la largeur de la berme.

6 Le document indique qu'une dégradation légère de la valeur d'un paramètre par rapport à la valeur souhaitable n'a qu'un effet très limité sur la sécurité et qu'il faut s'écarter fortement des valeurs souhaitables pour observer un effet notable en matière d'accidents.

### 3.4.4 Typologie de l'encadrement des valeurs

L'analyse des référentiels techniques permet de définir une typologie des limites (ou bornes) et, le cas échéant, des encadrements des paramètres de conception.

#### ■ **Des limitations absolues ou relatives**

Dans le cas le plus fréquent, les limites sont définies de manière absolue, quel que soit le document technique. Les limites sont exprimées en mètres, en % (en m/m), etc. Mais dans certains cas, elles sont définies de manière relative. C'est notamment le cas des rayons de virages successifs, dont le rapport des rayons doivent être compris dans une fourchette (0,66 à 1,5 en section courante des routes bidirectionnelles).

#### ■ **Amplitude**

Dans quelques cas, le paramètre de conception est encadrée par une plage de valeurs continues. Le paramètre est associé à un intervalle de type  $[X_{\text{Min}} - X_{\text{Max}}]$ . C'est par exemple le cas du dévers de la chaussée, compris entre -2,5 % et 7 % et la pente transversale entre -7 % et +7% (ou entre 2,5 % et 7% en valeur absolue).

Le cas le plus fréquent se rencontre en pratique pour fixer une limite aux paramètres de conception est une valeur unique ( $X = X_0$ ). Dans une situation donnée, un paramètre est censé avoir une valeur fixe, ni plus ni moins. C'est typiquement le cas des valeurs relatives au profil en travers (largeur des voies, largeur de BAU, largeur de BDG...), mais aussi les longueurs de clothoïdes (pour un rayon donné).

#### ■ **Limitations directes ou indirectes**

Enfin, au-delà de l'encadrement direct des valeurs des descripteurs, il existe aussi des moyens indirects de les encadrer. C'est notamment le cas en matière de tracé en plan par les pratiques de vérification de cohérence des vitesses – en lien avec la détermination de profils de vitesse. Limiter les écarts de vitesse entre deux éléments de tracé en plan successifs conduit soit à fixer un minimum pour la valeur aval, soit un maximum pour la valeur amont. Et les routes concernées étant souvent bidirectionnelles, la cohérence doit s'observer dans les deux sens bien évidemment.

En France, on ne trouve pas vraiment de telles pratiques d'évaluation. Mais il existe des règles donnant (avec les mêmes principes sous-jacents de limiter le différentiel de vitesse entre deux éléments successifs – souvent à 20 km/h) des contraintes dites d'enchaînements (rayons de virages successifs, entre longueurs d'alignement droit et courbure du virage suivant).

#### ■ **Limitations précises ou non**

Lorsqu'il s'agit de plafonner un paramètre, la fixation d'un plafond associé à un confort maximal, est souvent subjectif et approximatif, bien plus que pour une valeur plancher (associé à un confort minimal). Les règles associées le reflètent. Cela peut d'ailleurs conduire à y prêter une importance moindre, le caractère imprécis ou « flou » suggérant un caractère moins critique.

Ex: « éviter les courbes de grand rayon »<sup>7</sup>.

Hors, dans certains cas, c'est même le niveau de sécurité qui peut aussi être directement ou non dégradé (ex: routes express [11]).

7 Dans l'ARP, la formulation exacte est : « il convient en outre pour les projets de routes neuves : 1. d'éviter les tracés en succession de grandes courbes (tracés de type autoroutier), 2. de recourir de préférence à des alignements droits (...) alternant avec des courbes moyennes (de rayon supérieur au rayon minimal, et ne dépassant guère le rayon non déversé). ».

### 3.4.5 Principaux résultats

L'examen des documents montre que la notion de bornage ou d'encadrement des valeurs de conception des projets existe déjà dans la littérature. En effet de nombreuses valeurs font déjà l'objet, soit de bornes définies dans les recommandations, soit de valeurs discrètes imposées en fonction d'un ou plusieurs autres paramètres.

De plus, il apparaît que dans l'ARP aussi bien que dans le DMRB, l'idée **d'évaluation *a priori*** du comportement des usagers est mise en œuvre en vue d'optimiser la conception du projet. Cette méthode de travail, qui apparaît en France dans ce document<sup>8</sup>, paraît particulièrement intéressante dans un **contexte de recherche d'optimisation du projet**. Elle est porteuse de pistes de progrès si elle est envisagée comme la capacité d'évaluer un projet intégrant de nombreux paramètres ou contraintes, du point de vue du comportement de l'utilisateur. On notera que l'évaluation des visibilité d'un projet est une ébauche d'une telle évaluation mais la satisfaction de critère de visibilité sur la base de vitesses conventionnelles ne garantit aucunement le comportement d'un usager réel.

Les moyens d'évaluation relèvent en fait largement de l'action 3 de l'opération SERRES (méthodologies d'analyse et d'évaluation des effets des projets d'aménagements routiers ou d'exploitation du trafic).

## 3.5 Évaluation *a priori* de la conception du projet

Le plus souvent, l'idée de borner des valeurs vise *a priori* à limiter le surplus de confort apporté à l'utilisateur pour espérer en dégager des marges en termes de coûts ou d'impacts environnementaux sans pour autant dégrader la fonctionnalité ou le fonctionnement de la voie.

Les documents de conception sont construits sur un certain nombre de principes ou de paramètres qui reposent sur un modèle de comportement des usagers corroboré ou pas par des études ou des données expérimentales. Ils permettent la combinaison de différentes valeurs sans que les interférences entre valeurs soient toujours explicites.

*À titre d'exemple, le dimensionnement des dispositifs de déboîtement repose sur le principe de fonctionnement suivant : un usager doit percevoir le panneau de sortie et la balise de musoir suffisamment tôt pour éventuellement changer de file et se rapprocher de la file de droite en ralentissant jusqu'à une vitesse de 90km/h au droit du panneau de sortie. Il doit ensuite pouvoir ralentir suffisamment sur le biseau de décélération pour atteindre une vitesse de 70km/h au droit du point de sortie E 1.00 m. Il décélère ensuite à 1,5 m/s<sup>2</sup> pour pouvoir négocier la courbe qui suit.*

Le comportement des usagers peut être sensiblement différent de celui pris en compte pour la définition des paramètres de conception, qui relève d'un comportement conventionnel, sujet développé au chapitre 4. Le comportement des usagers est surtout différent d'un usager à l'autre. L'appréciation de la marge qui existe ou du risque qu'un usager « déborde » de ce comportement type (qui est selon les cas un comportement idéal, ou dégradé...) n'est pas simple et peu de littérature existe sur ces sujets. Des approches existent par exemple sur l'appréciation du risque visibilité [13]. La marge sur chaque paramètre pris séparément n'est pas toujours connue et dans tous les cas les effets combinés de plusieurs paramètres sont rarement appréhendés. Cette problématique qui questionne l'approche déterministe fait l'objet du chapitre 4.

<sup>8</sup> En fait, dans le document RECTUR (Recommandations pour la conception des tunnels à gabarit réduit) [12] une méthode de calcul des vitesses en fonction de la géométrie existe. Il s'agit de la méthode du diagramme des vitesses.

*Autre exemple : en matière de freinage en courbe, des hypothèses existent en ce qui concerne les frottements transversaux mobilisables. Si l'on combine la courbe avec un profil en long en pente, en rampe ou en parabole, il n'est pas du tout certain que la majoration forfaitaire de 25% de la distance d'arrêt en courbe de rayon < 5V couvre tous les cas et offre la même sécurité pour toutes les valeurs de rayon.*

**L'évaluation *a priori* du comportement de l'utilisateur** peut s'envisager de plusieurs manières :

- une modélisation du comportement basée sur l'explicitation de sous-modèles relatifs à chaque paramètre, pour laquelle les difficultés sur le comportement moyen, sur l'appréciation de la marge vont se retrouver. C'est ce type d'approche qui a été développé dans le rapport sur le risque routier pour la visibilité. C'est également l'approche du logiciel DIAVI<sup>9</sup> (Sétra) ou du DMRB, qui ciblent comme paramètres principaux la vitesse pratiquée/praticable en fonction des caractéristiques du projet.
- une modélisation du projet, par maquette numérique, et l'utilisation de panels d'utilisateurs qui utilisent/visualisent le projet au travers de la maquette. Il existe là aussi un biais lié à l'interface entre l'utilisateur et la maquette mais, en revanche, la capacité d'intégration de tous les éléments du projet est plus grande puisque c'est l'utilisateur lui-même qui fait cette intégration au travers de sa visualisation de la maquette.

Ces deux approches peuvent probablement être combinées.

Ce principe d'évaluation peut également servir pour mieux appréhender certaines alternatives lors de la modification ou de l'élaboration de doctrine.

Il est utile de préciser ici que le réalisme de la maquette n'est pas forcément un impératif dès lors que les utilisateurs/utilisateurs de la maquette ne sont pas des utilisateurs standards mais des membres d'un groupe de travail par exemple.

Il est également utile de souligner que les difficultés conceptuelles à simuler parfaitement la conduite d'un véhicule ont certainement été explorées par la littérature et n'ont pas été examinées dans ce document.

---

<sup>9</sup> Ce logiciel n'est cependant plus maintenu.

### 3.6 Conclusions

L'analyse des référentiels techniques en matière de conception, en France ou à l'étranger, montre que l'encadrement des valeurs existe déjà, contrairement au sentiment assez répandu. Les plages de valeurs pouvant être prises par un paramètre de conception, un descripteur de l'infrastructure, sont bornées par un « minimum », et souvent par un « maximum ».

En fait, cette appréciation est d'abord favorisée par des questions de terminologie. Cela tient aussi sans doute également à une représentation des règles de l'art, avec le constat qu'elles ne sont pas toujours bien connues ou interprétées, et qu'une plus grande importance est donnée aux « règles quantitatives » (associées à ds valeurs précises) qu'aux principes.

En tout état de cause, l'encadrement des valeurs a surtout pour vocation d'encadrer le « comportement » attendu des usagers. Mais il peut aussi avoir un lien avec la sécurité.

Les moyens d'encadrer une caractéristique (descripteur) de l'infrastructure sont assez diversifiés, voire hétérogènes, mais aussi sans doute lacunaires (l'exemple de la visibilité est suggérée dans le cadre de la démarche « Paysage et lisibilité » [14]).

Les encadrements sont souvent peu explicites, ou peu lisibles. En outre, les concepteurs appliquent volontiers plus naturellement une règle disant « le rayon doit être supérieur à la valeur  $R_{min}$  » que « on évitera d'introduire des grands rayons ». Et le contrôle des projets (contrôle intérieur ou extérieur) relève presque à coup sûr un écart même modéré au  $R_{min}$ , et pourra négliger plusieurs rayons manifestement trop grands...

L'analyse conduit surtout à faire émerger le besoin d'évaluation *in itinere* fonctionnelle et comportementale (ces notions sont explicitées au chapitre suivant). Un ensemble de limites à ne pas dépasser n'apporte pas forcément les garanties suffisantes d'atteindre les objectifs en matière de fonctionnement du système et en particulier de comportement des usagers. Si quelques processus de cette nature sont esquissés dans les « normes » actuelles, ils mériteraient d'être renforcés et étendus.

Il ne faut pas négliger les gisements associés aux interactions entre les règles techniques relatives aux caractéristiques des infrastructures d'une part et les processus d'évaluation de la performance (dont les comportements) obtenue.

## 4 D'une approche déterministe à une approche probabiliste

### 4.1 Notion de règles et paramètres conventionnels

#### 4.1.1 Paramètres conventionnels et paramètres fondamentaux

Par définition, est **conventionnel** ce qui résulte d'une convention ; et est une convention un accord tacite, un pacte implicite conclu entre des personnes, une communauté (ici technique). La définition comporte aussi l'idée que la convention comporte un caractère quelque peu fictif, ou du moins s'éloignant de la réalité.

Ce sens correspond bien à la qualification de règles ou paramètres dits conventionnels, dans les recommandations techniques en vigueur (ARP , ICTAAL, ICTAVRU [9]...).

La notion de fondamentaux de la conception renvoie aux justifications (les fondements) des règles de conception routière. Les **paramètres fondamentaux** sont ceux qui interviennent (explicitement ou non) dans les règles de conception. Par exemple, le temps de perception-réaction est un paramètre fondamental. Mais, la distance d'arrêt dans le calcul de laquelle le temps de perception-réaction intervient, l'est également. En effet, plusieurs règles de conception, c'est-à-dire conditionnant les caractéristiques des infrastructures, renvoient à la notion de distance d'arrêt.

La notion de paramètre conventionnel peut sembler proche de celle de paramètres fondamentaux, mais elle est différente. De nombreux paramètres fondamentaux sont certes conventionnels, mais ils relèvent parfois d'un autre registre, en particulier lorsqu'ils sont liés à des limites réglementaires ou constructives (largeur maximale des véhicules...).

Les indications de règles conventionnelles sont assez présentes dans les référentiels techniques. Les règles conventionnelles concernent principalement et explicitement :

- les **vitesses de conception**, c'est à dire les vitesses adoptées dans diverses règles de conception, en particulier :
  - la  $V_{85}$ , vitesse conventionnelle en dessous de laquelle roulent 85 % des véhicules en condition de circulation fluide ; elle caractérise un point précis d'une route et est susceptible de varier le long du tracé et selon le sens de circulation ;
  - la vitesse de référence ( $V_R$ ) d'une section de route, la vitesse conventionnelle qui permet de définir les caractéristiques géométriques limites d'aménagement de la section ; elle correspond à différents niveaux de confort (ICTAVRU, ARP...);
  - les vitesses conventionnelles d'entrée ou de sortie en des points théoriques (eux aussi conventionnels...), ou de circulation dans une bretelle (ICTAAL, ICTAVRU, guides sur les accès et les échangeurs...).
- les **règles de tracé en plan**, puisque directement et explicitement liées à la vitesse de référence (ou à la catégorie). Ainsi, les rayons du tracé en plan et les dévers associés en section courante sont choisis pour que, dans les conditions conventionnelles retenues, le véhicule ne soit pas



conduit à mobiliser plus d'une fraction (par exemple les deux tiers) du frottement transversal mobilisable (ICTAVRU). Ce niveau maximum admissible peut également être considéré comme conventionnel.

- la **distance d'arrêt**. Dans l'ARP, la convention porte sur les conditions de chaussée mouillée, et dans le guide [15] également sur les pneumatiques. Dans l'ICTAAL, la distance d'arrêt est définie comme une « distance conventionnelle théorique nécessaire à un véhicule pour s'arrêter » et, dans ce document comme dans l'ICTAVRU, les dispositions conventionnelles portent sur les divers aspects intégrés dans la distance d'arrêt, et plus largement les conditions de visibilité (y compris les positions du point d'observation et de la cible, etc.).
- la **distance de manœuvre** en sortie (qui est liée à une distance de visibilité) est aussi définie comme une « distance conventionnelle requise en approche d'une sortie pour permettre au conducteur d'exercer un choix de changement de direction et effectuer les manœuvres nécessaires » (ICTAAL).

De façon un peu moins explicite, d'autres paramètres sont en pratique aussi conventionnels : l'accélération en palier de 1 m/s<sup>2</sup>; la décélération en palier de 1,5 m/s<sup>2</sup>... Une liste exhaustive serait longue à établir.

Parmi les dispositions conventionnelles, on peut finalement distinguer les aspects suivants, du plus général au particulier :

- une **méthode conventionnelle** : la règle est définie sur la base d'un scénario conventionnel et d'une approche déterministe (le calcul de la distance d'arrêt et des rayons limites en sont les exemples les plus évidents) ;
- une **formule conventionnelle** : le calcul du descripteur (rayon, distance d'arrêt, dévers...) est basé sur une formule simplifiée du phénomène (s'en tenant aux aspects principaux rentrant en jeu) – c'est le degré de simplification du processus concerné qui est conventionnel. Exemples : distance d'arrêt servant dans la détermination des distances de visibilité, équation de stabilité dynamique définissant les relations entre rayons horizontaux, dévers et vitesse...
- les **paramètres conventionnels**, qui interviennent dans certaines règles de l'art, tels que la V85, le temps de perception-réaction, l'adhérence mobilisable en longitudinal ou transversal... Les hypothèses implicites, mais déterminantes (marge de sécurité...), comme pour la part mobilisable/mobilisée de l'adhérence disponible relèvent aussi des paramètres conventionnels.
- Les **dispositions de pure convention** (qui n'ont de valeur ou de réalité que par l'effet de la convention), et qui relèvent de la définition, sans implication sur la conception tels que le signe des dévers, la définition du rayon en plan (mesuré par rapport au bord intérieur de la chaussée), la ligne de référence du profil en long (l'axe de la plate-forme en général), les dimensions de l'îlot (définies comme l'enveloppe de l'îlot peint, etc.). Nous écartons de notre propos ce cas qui n'a pas d'intérêt particulier puisque sans conséquence sur les caractéristiques effectives de l'infrastructure.

Cette typologie a forcément un caractère quelque peu artificiel, et il est parfois difficile en pratique de démêler ce qui relève de la méthode, de la formule (qui en découle), des paramètres qui composent cette dernière, etc. Elle permet néanmoins de mettre en exergue que les recommandations techniques sont conventionnelles à plusieurs titres. Cela ne signifie évidemment pas, et ce n'est pas du tout le propos, que les règles de l'art sont pour autant totalement arbitraires (nous avons par ailleurs bien expliqué en introduction les logiques et les principes rentrant en ligne

de compte dans l'élaboration des recommandations techniques).

Le caractère conventionnel des règles de conception interpelle néanmoins le scientifique, en particulier dans le cadre d'une tentative de proposer des évolutions de nature à optimiser le système. Comment modifier l'édifice, ou en réformer une partie ? Sur la base de quels principes rationnels ? Cela doit-il conduire à passer d'un système de conventions à un autre système de convention ? Le cas échéant, comment s'assurer de la robustesse du corpus modifié ?

## 4.2 Avantages et inconvénients des approches conventionnelles

### 4.2.1 Les avantages et les qualités de l'approche conventionnelle

L'approche conventionnelle (ou classique) présente plusieurs qualités indéniables :

- **accessibilité** : elle se base sur des formules en cohérence avec les principes cinématiques ou dynamiques élémentaires. C'est typiquement le cas du calcul de la distance d'arrêt ou d'accélération, des rayons minimums horizontaux ou verticaux. Cela leur confère un caractère rassurant, presque intuitif, car elle renvoie à une culture technique partagée, contrairement aux techniques probabilistes que nous introduiront plus loin.
- **simplicité** : le processus de conception est simple ; les simplifications dans les hypothèses et les modèles adoptées les rendent aussi faciles en pratique à utiliser ou à manipuler. Les fonctions sont aisément inversibles. Par exemple, si une formule relie le rayon minimum  $R$  à la vitesse et au dévers avec une relation du type  $R = f(V | d)$ , on exprime facilement la vitesse comme une fonction du rayon et du dévers :  $R = f^{-1}(R | d)$ . Aussi la formation des concepteurs routiers (ingénieurs et techniciens) est relativement facile et rapide.<sup>10</sup>
- **homogénéité** : c'est son principal avantage du point de vue des usagers – elle garantit une certaine homogénéité du réseau routier. Les caractéristiques d'un type de voie et d'une catégorie donnée (ex : les autoroutes de catégorie  $L_1$ , les routes de catégorie  $R_{80}$ ) seront, sinon identiques, en tout cas proches, même si le nombre d'intervenants, de responsables, de gestionnaires est très important (État et collectivités, bureaux d'ingénierie publique ou privés...). Dans une certaine mesure, cette cohérence s'exprime au-delà de nos frontières, même s'il n'existe pour ainsi dire pas de recommandations techniques internationales (cf. AGR [16]). Cette homogénéité reste néanmoins en partie théorique pour certaines règles (cf. *infra*).

### 4.2.2 Limites et inconvénients de l'approche conventionnelle

Inversement, l'approche conventionnelle présente plusieurs limites intrinsèques, qui sont souvent la contrepartie des avantages exposés ci-avant.

L'approche conventionnelle souffre surtout d'une **définition vague, imprécise et implicite** des concepts sous-jacents. C'est par exemple le cas du concept de vitesse de conception ou de référence, ou encore du niveau de confort et de sécurité (utilisée pour les caractéristiques minimales du tracé), de la décélération adoptée dans le calcul de la distance d'arrêt.

<sup>10</sup> Elle est néanmoins complexifiée par le nombre de situations (types de voies, composantes...) à connaître, et par la variété des enjeux à intégrer.

Elle conduit aussi souvent à **une simplification excessive** des phénomènes physiques (cette remarque peut être considérée comme un cas particulier de l'imprécision évoquée ci-dessus). Aussi, les niveaux fixés dans les règles peuvent-ils être surestimés<sup>11</sup> plus ou moins significativement (par rapport au niveau de service ou de sécurité recherché). En effet, le processus de définition des règles de l'art intègre ces incertitudes – la limite des connaissances et des modèles – ce qui tend à prévoir des marges substantielles.

Mais, plusieurs auteurs ([17], [18]...) attribuent principalement les limites des règles de conception à **l'approche déterministe** utilisée pour fixer les limites dans les règles de conception. En effet, alors que la plupart des facteurs intervenants dans les processus de conception géométrique ont une nature éminemment stochastique (temps de perception-réaction, vitesse pratiquée, adhérence mobilisable, etc.), l'approche classique (déterministe) se base sur une valeur fixe, définie préalablement, pour représenter chacun des paramètres.

Les critiques comportent de fortes similitudes avec celles formulées à l'endroit de l'utilisation de l'évaluation déterministe dans le domaine de l'industrie conception de produits pour en appréhender la fiabilité [19].

La définition de règles dans le cadre de l'approche conventionnelle nécessite d'arrêter une valeur pour chaque paramètre fondamental impliqué. Les paramètres relevant de domaines différents (chaussée, ingénierie du trafic, sécurité...) et les considérations étant différentes et parfois implicites, **il n'y a pas de logique d'ensemble et de cohérence globale**. Une illustration nous en est fournie par les paramètres rentrant dans le calcul de la distance d'arrêt :

(i) la vitesse est traditionnellement la V85 soit le 85<sup>e</sup> centile des vitesses (« en cohérence avec les pratiques internationales »), souvent écrêtée à la vitesse limite autorisée<sup>12</sup> (une variable du projet) ;

(ii) l'adhérence mobilisable est en théorie issue du « fuseau des LPC » et est réputée correspondre au premier décile de la distribution des CFL<sup>13</sup> ; (iii) la valeur retenue pour le temps de perception-réaction (2 secondes) est issue d'expérimentations *in situ* et correspond plutôt au 95<sup>e</sup> centile<sup>14</sup>. Mais, sans doute personne ne pourrait dire à quoi correspond la distance d'arrêt ainsi calculée, même théoriquement – sinon une valeur qui a assez peu de chances d'être dépassée dans les conditions conventionnelles de chaussée mouillée et d'exploitation prises en compte.

Zwingmann (ibid.) constate que la formulation déterministe conduit à des critères de calcul qui n'utilisent qu'un seul coefficient de sécurité global, aussi appelé « coefficient d'ignorance », pratique dans laquelle la prise en compte de toutes les incertitudes et marges de sécurité est ramenée à un seul coefficient. C'est typiquement le cas de la définition des rayons de courbure. La formule « fondamentale » intègre un coefficient de sécurité ou de confort (en l'espèce : respectivement de 2/3 ou 4/9). Cela ne nuit pas forcément à la robustesse de la conception, mais constitue une réelle difficulté lorsqu'il s'agit de rechercher des optimisations du système. À noter, que la situation n'est pas plus favorable lorsqu'un coefficient de sécurité plus ou moins arbitraire est adopté pour les divers paramètres rentrant en ligne de compte dans la formule. Quelle est la marge de sécurité globale de cette combinaison ? En tout état de cause les marges sont souvent implicites voire mal connues ou documentées, et souvent hétérogène.

11 En théorie, ils peuvent aussi être sous-estimés, mais ce cas se rencontre rarement en pratique.

12 Notion ajoutée en France suite à la remarque suivant laquelle il n'est pas raisonnable de dimensionner des infrastructures en tenant compte de comportements déviants...

13 Théoriquement, mais ce n'est pas vraiment le cas en pratique.

14  $P(X < \mu + 2 \sigma) \approx 95 \%$  sous l'hypothèse d'une distribution gaussienne.

Un niveau élevé d'exigence (ou une marge de sécurité élevée) n'est pas intrinsèque à l'approche conventionnelle ; mais elle en est souvent la conséquence, en particulier pour les règles associées à des phénomènes assez complexes, intégrant divers paramètres comme le calcul de la distance d'arrêt. Elle conduit au cumul de marges de sécurité plus ou moins substantielles.

Or, un niveau systématiquement élevé d'exigence peut conduire soit à des surcoûts disproportionnés, soit à développer des stratégies d'évitement de la règle (dérogation, interprétations plus ou moins raisonnables, tolérances...) hétérogènes selon les services, les projets, sans réelle maîtrise du niveau de service atteint *in fine*.

Zwingmann souligne encore que ce coefficient de sécurité non seulement conduit souvent à un surdimensionnement mais aussi que la formulation déterministe est inopérante lorsqu'il s'agit de réduire le coefficient de sécurité pour des questions de coûts (ou autres contraintes techniques ou enjeux divergents) : il n'est pas possible de quantifier la manière dont le risque de défaillance augmente, et donc de déterminer un seuil acceptable. Ce constat qui est formulé de manière générale pour la conception de systèmes techniques est au cœur de la problématique de la conception des infrastructures routières.

Par ailleurs, les approches déterministes ne prennent pas explicitement ou directement en compte les aspects économiques. Elles ne permettent pas (et n'incitent pas) le concepteur – ou plutôt devrait-on dire le processus de conception dans lequel interviennent maître d'œuvre, maître d'ouvrage, auditeurs, etc. – à développer une appréciation raisonnée, en particulier dans les cas où un écart par rapport aux « normes » est requis ou souhaitable.

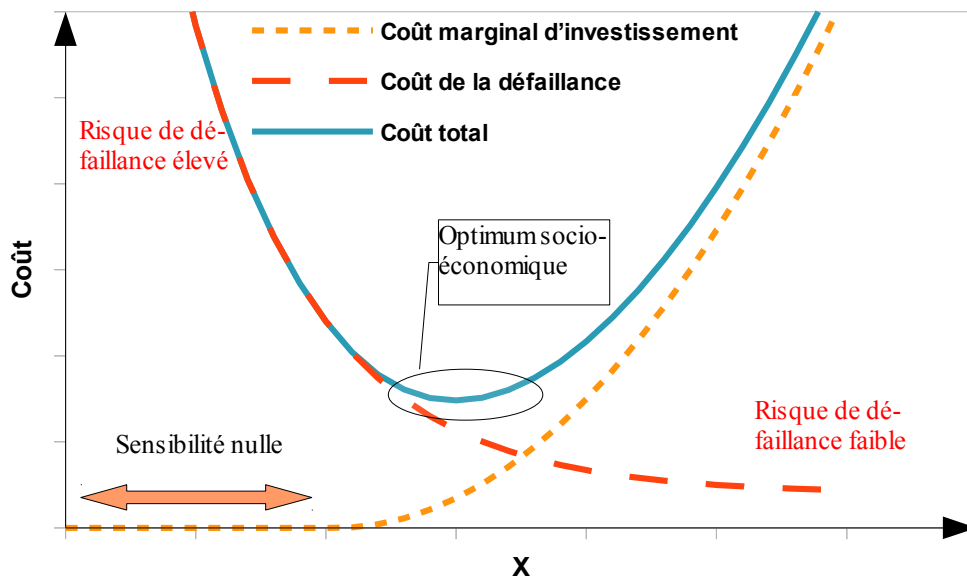


Illustration 1: Rentabilité socio-économique et fiabilité

La figure ci-dessus illustre le principe adapté à un cas virtuel schématique mais pouvant se rapprocher de cas concrets. Un descripteur de l'infrastructure (rayon, largeur, distance...) est souvent associé à un risque de défaillance. Le risque augmente quand le descripteur diminue et vice-versa.<sup>15</sup> Souvent, la probabilité de défaillance adopte une allure exponentielle : en deçà d'un certain niveau pour ce descripteur, le taux d'accroissement du risque augmente très rapidement. Le

15 Pour la déclivité et d'autres paramètres il faut inverser le raisonnement.

risque de défaillance peut être associé à un coût social, qu’il s’agisse d’enjeux de sécurité, de temps perdu, voire de confort. Par ailleurs, les caractéristiques effectives d’un projet d’aménagement sont également sensibles aux recommandations relatives à ce descripteur, avec une courbe qui adopte souvent une forme quadratique. En-deçà, d’un seuil la sensibilité est faible, voire nulle : un minimum étant de toute manière offert pour des raisons physiques ou extérieures aux référentiels techniques. Le coût global<sup>16</sup> passe a priori par un minimum. Sur une plage plus ou moins large du descripteur considéré, le coût global sera sans doute peu sensible. Mais selon les cas, les plages admissibles pour le descripteur pourra recouvrir ou non cette optimum socio-économique.

Enfin, l’approche déterministe permet difficilement de prendre en compte l’environnement d’exploitation du projet (conditions d’utilisation, conditions extérieures...). Une approche probabiliste le permet (prise en compte d’un environnement aléatoire).

Dans diverses disciplines techniques, ces **limitations ont conduit les ingénieurs à s’intéresser aux approches et formulations probabilistes.**

## 4.3 Les approches probabilistes

### 4.3.1 Une alternative logique et prometteuse

L’utilisation d’approches probabilistes est naturelle pour appréhender les risques liés à l’usage de la route, en compléments d’approches plus classiques (épidémiologiques, cliniques...). Pour autant, elles ne sont à notre connaissance pas utilisées, ni en France, ni à l’étranger, pour établir des règles en matière de conception des infrastructures routières.<sup>17</sup>

Des approches probabilistes peuvent être particulièrement adaptées aux phénomènes liés à la sécurité. Ces approches ne sont pas équivalentes mais cohérentes avec l’approche, désormais bien ancrée, de considérer l’insécurité comme le dysfonctionnement du système Homme-Véhicule-environnement, qui nous place dans un cadre systémique et multifactoriel. Ces dysfonctionnements ne sont pas complètement évitables, mais l’occurrence et les conséquences de défaillances du système doivent être minimisées, ou du moins maîtrisées, en deçà d’un niveau acceptable d’un point de vue socio-économique. En tout état de cause, le processus de conception nécessite d’intégrer une approche rationnelle des incertitudes sous-jacentes. Le grand nombre de paramètres intervenant, leur large distribution, et des modèles éventuellement non linéaires, suggèrent de faire appel à la **théorie de la fiabilité**.

L’introduction de la théorie de la fiabilité dans la conception géométrique des routes a été analysée dès le milieu des années 80 aux États-Unis [17], puis par d’autres auteurs au cours des deux décennies suivantes. Ces travaux de recherche ont suivi le développement de son introduction dans le domaine du calcul des structures [20]. Ils s’intéressent au **calcul de la probabilité de défaillance**

16 En pratique, il existe une interaction entre les paramètres d’un projet, et on ne peut raisonner globalement qu’au niveau du système.

17 Les recommandations élaborées dans les différents pays développés ou en voie de développement, sont très proches dans les principes et la méthode, même si les valeurs limites associées aux règles peuvent différer sensiblement.

18 Dans les articles anglo-saxons sur le sujet, le terme de *probability of non-compliance* est souvent utilisée. La traduction littérale de « probabilité de non conformité » nous semble prêter à confusion, car il ne s’agit pas d’un risque de ne pas être conforme à une règle préétablie, mais d’un risque de ne pas satisfaire une (ou plusieurs) conditions techniques de sollicitation, de

**du système** dans certaines conditions opérationnelles, pour fixer des limites garantissant un niveau de sécurité minimum. Ils visent à s’affranchir des limites intrinsèques de l’approche déterministe utilisée pour définir les recommandations en conception géométrique – approche que l’on peut qualifier de conventionnelle – en utilisant une approche alternative, plus rationnelle et économiquement rentable.

En matière de conception routière, la notion de probabilité de défaillance peut être interprétée comme une occurrence d’accidents rapportée au nombre total de véhicules sur la section ou le site considéré. L’occurrence d’une condition de circulation défavorable, représentée par une valeur élevée de cette probabilité, ne conduit pas forcément à un accident, *a fortiori* un accident corporel, mais plutôt à une manœuvre d’urgence, une situation de conduite avec une insécurité forte ressentie, un incident [21]. En effet, les accidents de la route résultent de phénomènes complexes qui dépendent de facteurs multiples, dont certains ne peuvent être appréhendés au stade de la conception. Les connaissances ne permettent pas d’établir une association précise et exhaustive entre les conditions de conduite et le risque de collision. Il reste par ailleurs un certain niveau d’approximation que ce soit dans la formulation du modèle que dans les distributions retenues pour les variables qui y sont intégrées. La probabilité de défaillance doit donc être interprétée comme une probabilité subjective.

Les aspects liés à la sécurité apparaissent comme particulièrement importants et nous ont déjà servi d’illustration, mais les considérations liées aux dysfonctionnements du système « route » peuvent se décliner dans le domaine de l’ingénierie du trafic (risque qu’un niveau de service minimum ne soit pas offert) ou des nuisances (risque que l’usage de la route conduise à des implications environnementales particulièrement néfastes...). L’application de la théorie de la fiabilité dans le domaine aura forcément des limites, car les performances attendues des infrastructures routières sont de nature très diverses, souvent qualitatives (effet de coupure par exemple) ou la connaissance des phénomènes sous-jacente insuffisante.

À l’instar d’un produit, une infrastructure routière est définie à partir d’un cahier des charges décrivant ses performances, de qualité, de fiabilité (dans notre domaine on parlera plutôt de sécurité routière, de niveau de service, de maîtrise des risques de pollution, etc.) explicitement ou implicitement à travers des caractéristiques techniques. Ces caractéristiques sont *de facto* évaluées *a posteriori* de la conception et, malgré les divers contrôles avant mise en service (IPMS, audits pour les aspects liés à la sécurité), principalement évaluées après mise en service, c’est-à-dire en condition d’exploitation. À la différence de la plupart des produits manufacturés, il n’est pas possible en matière de conception routière de mettre en œuvre des essais sur des prototypes (sauf, bien sûr, sur des composantes limitées comme des techniques de chaussée ou des équipements de sécurité).<sup>19</sup>

S’il existe des démarches qualité pour les projets routiers, on peut estimer que, d’une certaine manière, **la fiabilité du système** créé ou modifié n’est pas vraiment appréhendée lors des phases de conception. La maîtrise de cette fiabilité apparaît comme pour le moins utile qu’elle s’exprime à travers les référentiels techniques de conception ou à partir des processus les accompagnant. Il s’agit aussi de développer ou enrichir des outils permettant la validation des objectifs de conception et la comparaison de diverses variantes / alternatives. Cette réflexion s’appuie sur une transposition, dans le domaine de la conception des infrastructures routières, de principes et approches employées dans le domaine de la conception de « produits » *lato sensu*, voire notamment [19].

---

demande, etc qui elles-mêmes ne sont a priori pas constantes et déterminées.

19 Des travaux sur les simulateurs de conduite, notamment menés par l’IFSTTAR, ont montré leur intérêt dans le domaine de la recherche, mais ne permettent pas d’envisager à court ou moyen terme leur utilisation dans le cadre opérationnel, même s’il convient de ne pas négliger les perspectives en la matière. En tout état de cause le prototype en question resterait virtuel (maquette numérique).

La phase de validation d'un projet (ou plus précisément des solutions techniques qui le déterminent) est une étape fondamentale. Il s'agit de vérifier que les performances sont conformes aux spécifications du cahier des charges au moyen de tests/contrôles effectués lors des différentes phases de conception. En matière de projets routiers, la validation est assurée principalement par la vérification de la conformité à un ensemble de règles préalablement définies « les règles de l'art ».

On peut à ce stade tenter un parallèle entre les méthodes de l'ingénierie routière et **l'ingénierie concurrente**. Leurs objectifs respectifs ne sont pas les mêmes (l'ingénierie concurrente vise à acquérir un avantage concurrentiel en lançant des produits rapidement avant une réaction de la concurrence), mais il s'agit néanmoins dans les deux cas d'**obtenir un produit « bon du premier coup »**. Les méthodes de l'ingénierie concurrente permettent d'aborder le processus de conception plus efficacement (ibid.). Ces approches ne dispensent pas de valider les performances du produit conçu. De telles considérations (comme celles déjà formulées au chapitre 3) touchent au processus de conception et à ce titre peuvent sembler s'éloigner de l'objet de l'action 4. Néanmoins, à plusieurs reprises au cours de ce rapport, nous soulignons que des gisements significatifs existent en reliant plus étroitement les recommandations concernant les caractéristiques techniques des routes et les processus d'évaluation *a priori* de l'atteinte des objectifs de performance atteints par le projet ainsi conçu. Je préfère parler d'**évaluation in itinere** pour souligner que cette évaluation est menée au cours de l'élaboration du projet et si possible tout au long de la phase de conception.

L'utilisation des approches probabilistes permettant d'appréhender l'activité de conception ou d'aménagement du réseau dans le cadre de la théorie de la fiabilité constituent des changements très significatifs de nature à constituer une rupture par rapport aux pratiques actuelles. Au-delà des questions d'ordre statistique, ce changement de paradigme nécessite de développer de nouveaux concepts, d'adapter les méthodes, de créer des outils permettant de la mettre de manière opérationnelle.

## 4.4 Cadre théorique

### 4.4.1 Quelques notions sur la théorie de la fiabilité

Le cadre théorique de la démarche proposée pour définir des recommandations techniques se base notamment sur la théorie de la fiabilité. Il ne s'agit pas ici de développer ces aspects théoriques, mais nous en rappellerons seulement les principes.

#### ■ La fiabilité

**La fiabilité se définit comme la probabilité qu'un système accomplisse la fonction pour laquelle il a été conçu, dans les conditions données et pendant une durée donnée** (NFX 060-010 – AFNOR 1991) [19].<sup>20</sup>

La fiabilité n'est pas intrinsèque au projet (l'infrastructure conçue ou aménagée) ; elle est contextuelle.

#### ■ Notion de défaillance

<sup>20</sup> La notion de durée de vie (d'un produit) n'est pas directement transposable dans notre cas : elle ne correspond pas à la notion courante de durée de vie d'une infrastructure. Dans la définition *supra*, elle constitue une mesure de la quantité de service rendu. Dans le cas d'une infrastructure, et en considérant des fonctions de service (sécurité, capacité...), il s'agirait plutôt du nombre d'utilisation sans défaillance (l'infrastructure n'est évidemment pas considérée comme en fin de vie, parce que l'on observe une défaillance, ou même plusieurs, même si cela peut conduire à une maintenance).



L'approche de la fiabilité nécessite de définir préalablement un mode de défaillance donné pour une composante du système clairement identifiée.

« Une défaillance traduit la cessation d'une entité à accomplir la fonction pour laquelle elle a été conçue. Une entité est déclarée défaillante lorsque ses caractéristiques évoluent en dehors des tolérances définies lors de la conception ou si elle ne satisfait pas à une ou à plusieurs attentes du client. Le mode de défaillance est l'effet par lequel une défaillance est observée (le symptôme). À chaque défaillance on associe un mode de défaillance et des causes de défaillance. » [19]

Le niveau de fiabilité obtenu dépendra du mode de défaillance choisi. Lorsqu'il convient de s'intéresser simultanément à plusieurs modes de défaillances et/ou à plusieurs composantes ou sous-systèmes, il est nécessaire de faire appel à des méthodes spécifiques.

#### ■ **Fiabilité d'un système complexe**

Zwingmann traite de la fiabilité prévisionnelle d'un système multi-composants. Il expose des méthodes permettant d'appréhender la fiabilité d'un système global, en permettant de décomposer le problème en composants et sous-systèmes comme la modélisation markovienne, les schémas blocs, etc.

Par ailleurs, le comportement d'un composant ou d'un sous-système dépend de ses différents modes de défaillance, notion déjà présentée au paragraphe précédent. Une méthode comme l'arbre de défaillance permet de recenser les causes et défauts entraînant l'apparition d'un événement indésirable (ibid.).

#### ■ **Évaluation fonctionnelle et comportementale**

L'**analyse de la fiabilité** a vocation à s'inscrire dans une approche d'évaluation fonctionnelle et comportementale. Le comportement dont il est question ici n'est pas celui des usagers de la route mais du système étudié.

Dans le cadre d'une approche fonctionnelle, la fonction exprime un résultat attendu, et non la solution permettant d'obtenir ce résultat. Autrement dit, on s'intéresse à la finalité, plus qu'à la caractéristique du produit (du projet). Cela nécessite de bien connaître les besoins des utilisateurs – dans le contexte d'une infrastructure routière, ceux des usagers.

Le principe d'analyse consiste à définir un critère ou une combinaison de critères permettant l'évaluation de la caractéristique spécifiée (dans le cahier des charges). Ces critères sont identifiés et caractérisés par une ou plusieurs variables de conception ; ces variables sont données par les outils de CAO. L'ensemble des critères est agrégé afin d'obtenir une mesure quantifiable. En comparant cette mesure à une valeur limite, on établit un indice de performance dans l'environnement de comportement étudié [22].

Revenons aux critères permettant d'apprécier la satisfaction des spécifications du cahier des charges. Les critères comportent des valeurs limites (ou seuils), généralement assorties de tolérances. Cette notion, sans être totalement absente de la conception géométrique, n'est pas réellement formalisée et mise en œuvre.

Globalement, il ressort le besoin d'une évaluation a priori des caractéristiques (en tant qu'évaluation de la performance du système vis-à-vis de un ou plusieurs critères, et pas seulement du respect de telle ou telle valeur).

En matière d'**évaluation comportementale**, un objectif opérationnel est que l'analyse du comportement donné puisse **s'intégrer dans un environnement de conception** (et non traité ultérieurement, en phase de contrôle) et dans la mesure du possible, dans un souci d'efficacité, assisté par ordinateur (outil de CAO).



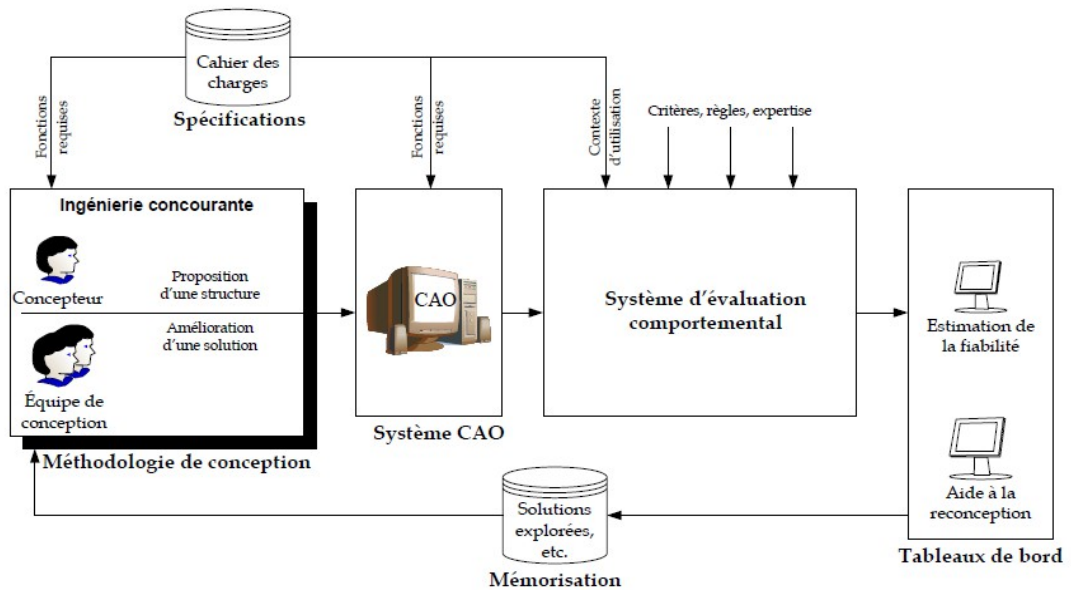


Illustration 2: Évaluation comportementale en théorie de la fiabilité, d'après [19].

### ■ Fiabilité et maintenabilité

Par ailleurs, en matière de conception de produits, il est courant de tenir compte conjointement de la fiabilité et de la « maintenabilité » [19]. Cette notion et les techniques afférentes ne seront pas développées ici. Néanmoins, la notion de maintenabilité pourrait permettre d'exploiter de manière maîtrisée des marges de manœuvre appréciable.

Exemple : dans l'hypothèse où l'on serait en mesure de maîtriser sur une longue période le niveau minimal d'adhérence (adhérence minimale garantie<sup>21</sup>) il serait possible d'adopter des distances de visibilité très sensiblement inférieures tout en offrant le même niveau de fiabilité. Un choix de technique appropriée (BDDr sur route à grande vitesse) y contribue sensiblement, mais l'analyse de sensibilité menée dans l'opération Risque routiers [13] suggère que l'impact ne dépasse pas 5 %. Un niveau d'entretien approprié est nécessaire. Si une telle stratégie réduit le coût d'investissement, elle a des implications sur le niveau de maintenance de l'infrastructure qu'il faut également pouvoir soutenir.

## 4.4.2 Aspects statistiques

L'analyse de fiabilité traite notamment des incertitudes des rapports entre contrainte (ou sollicitation) et résistance en matière d'évaluation structurale, ou par extension des rapports entre demande et offre et au sein d'un système donné.

La méthode s'appuie sur une fonction de performance (F) qui décrit le rapport entre l'offre (O) et la demande (D) du système, en fonction des variables indépendantes (dans le domaine de l'évaluation structurale on parle plutôt de fonction d'état limite) [20]:

$$F = O - D \quad (1)$$

21 Cela ne signifie pas qu'il faut retenir une valeur fixe pour ce paramètre, mais qu'une telle stratégie va influencer sur la distribution des valeurs rencontrées, qui devraient avoir une probabilité beaucoup plus faible d'être inférieure à un niveau donné.

L'approche considère la demande et l'offre comme deux variables qui peuvent prendre des valeurs aléatoires (Fig. 4). Ces variables sont alors définies par leur fonction de densité de probabilité, respectivement  $f_o$  et  $f_D$ . La fiabilité est la probabilité que la contrainte (demande) reste inférieure à la résistance (offre) du produit ou système.

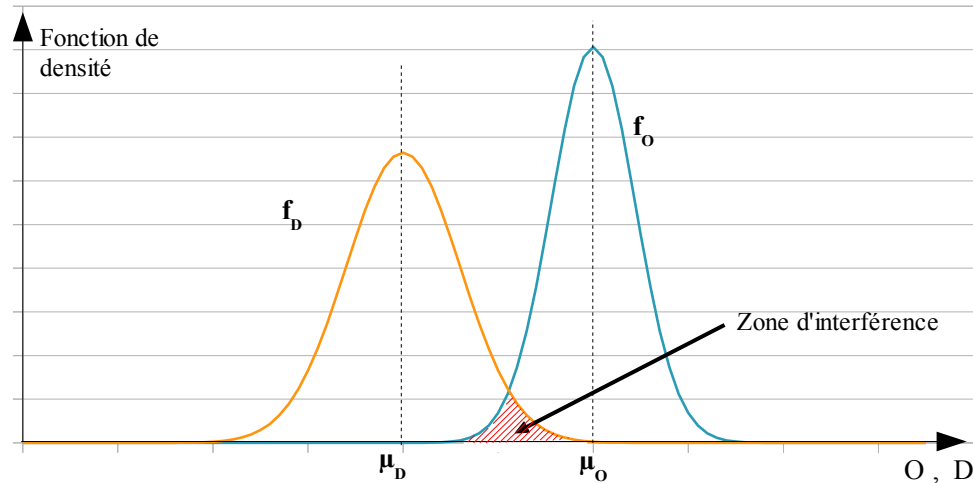


Illustration 3: Distribution de l'offre et de la demande; zone d'interférence

Dans la zone d'interférences OD, la probabilité que la demande soit supérieure à l'offre D est non nulle. Connaissant les deux fonctions de densité  $f_o$  et  $f_D$ , il est alors possible de calculer la *probabilité de défaillance*  $P_f$  :

$$P_f = P(F < 0) = P(O < D) = \int_0^{\infty} f_D(y) \left[ \int_0^y f_o(x) dx \right] dy \quad (II)$$

Comme la probabilité de défaillance est généralement très faible ( $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$ ...), la fiabilité est souvent exprimée en fonction de **l'indice de Cornell  $\beta$** . Elle est calculée à partir de cette probabilité de défaillance, comme :

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (III)$$

où  $\Phi$  représente la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite.

Cela nécessite de respecter certaines conditions strictes concernant O et D, notamment où O et D suivent des lois normales (et donc F). On a alors :

$$\beta = \frac{E(O - D)}{\sigma(O - D)} = \frac{\mu_o - \mu_D}{\sqrt{\sigma_o^2 + \sigma_D^2}} \quad (IV)$$

L'indice de fiabilité  $\beta$  traduit l'éloignement entre la situation moyenne et la situation critique. Le système est d'autant plus sûr que  $\beta$  est élevé.

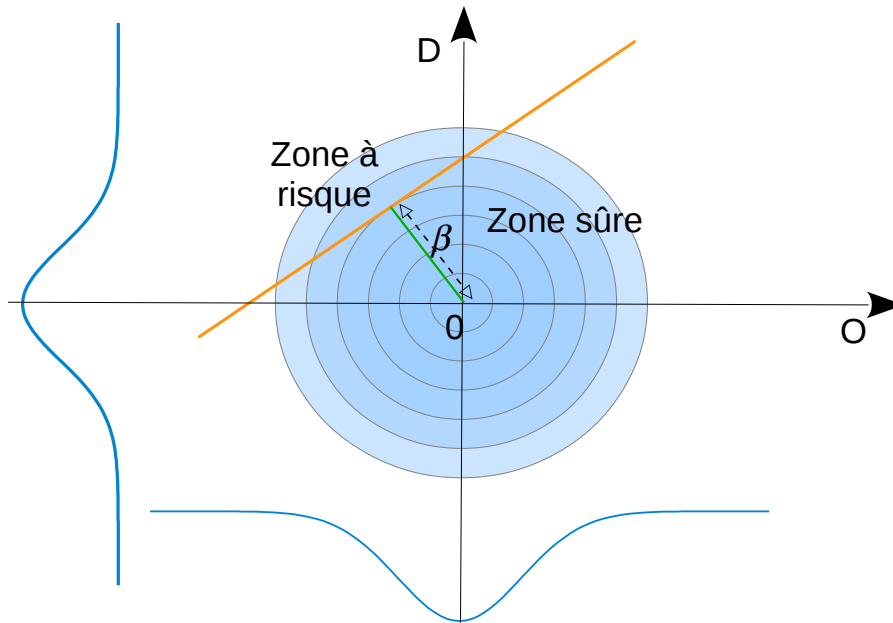


Illustration 4: Représentation géométrique de la fiabilité dans l'espace normé

Des précisions théoriques sont fournis par exemple dans [20].

#### ■ Simulation de Monte-Carlo

La simulation de Monte Carlo<sup>22</sup> est une technique mathématique informatisée utilisée depuis longtemps<sup>23</sup> dans de nombreux domaines scientifiques, avec des applications notamment dans la finance, la gestion de projet, l'énergie, la production, l'ingénierie, la recherche et le développement... Elle a servi à modéliser toute une variété de systèmes physiques et conceptuels.

La technique de simulation de Monte Carlo reproduit le fonctionnement d'un système par le biais d'une méthode analytique et analyse les effets des variations des entrées sur les sorties du système. Elle permet de tenir compte du risque dans l'analyse quantitative et la prise de décision. La simulation de Monte Carlo présente une plage d'issues possibles et leurs probabilités de réalisation suivant des scénarios définis.

D'un point de vue statistique, cette méthode converge lentement, mais a comme intérêt d'être insensible à la dimension des problèmes étudiés (contrairement à des méthodes classiques d'analyse numérique qui ne sont performantes qu'en « petite dimension »). La justification théorique de la méthode est la loi forte des grands nombres qui permet de ne faire appel qu'à une réalisation d'un échantillon.

La méthode consiste à isoler un certain nombre de variables-clés du phénomène considéré et à leur affecter une distribution de probabilités. Pour chacun de ces facteurs, on effectue un grand nombre de tirages aléatoires dans les distributions de probabilité déterminées préalablement, afin de déterminer la probabilité d'occurrence de chacun des résultats. Celle-ci nous fournit ainsi des informations sur l'éventail des résultats possibles et les risques de rencontrer des situations à risque (valeurs négatives de la fonction de performance par exemple).

22 Elle tire son nom des jeux du Casino de Monaco.

23 Elle a été développée durant le projet Manhattan dans les années 40.

## 4.5 Introduction d'une vision dynamique

Les approches probabilistes permettent ainsi d'appréhender la probabilité de défaillance de tout ou partie d'un système dans des conditions d'exploitation données. Pour cela, on va généralement chercher à élaborer des modèles reproduisant de manière raisonnablement précise le fonctionnement de ce système. L'élaboration de modèles de fonctionnement et la définition de distributions pour les facteurs (entrées) se base sur des bases de données et sur des résultats d'étude, que l'on choisit parmi les plus récentes.

Mais, l'objectif n'est pas seulement d'élaborer un modèle représentatif de la situation actuelle. **Il s'agit aussi de dégager une vision rétrospective et une vision prospective :**

- **une vision rétrospective** pour apprécier comment la fiabilité du système a théoriquement évolué, par exemple depuis la publication du référentiel technique en vigueur (en pratique souvent 10 à 20 ans en matière de conception géométrique) ;
- **une vision prospective** pour évaluer de quelle manière la fiabilité (le risque de défaillance) va évoluer dans le futur : dans quel sens et avec quelle amplitude.

En effet, si les approches probabilistes donnent des résultats sous forme d'indicateurs qui ont une interprétation concrète (par exemple une probabilité d'incident, de saturation...), elles comportent comme toute démarche modélisatrice de limites qui tiennent notamment aux hypothèses simplificatrices inhérentes au modèle. L'interprétation des modèles est souvent plus aisée quand il s'agit de comparer des résultats de plusieurs scénarios. Ces scénarios peuvent correspondre à plusieurs variantes du projet (dans un cadre opérationnel), à plusieurs niveaux d'exigence, etc.

Dans le cadre de l'élaboration de nouvelles recommandations, les approches probabilistes peuvent nous permettre d'apprécier la sensibilité sur la performance du système de l'évolution de l'une des conditions d'exploitation (au sens large du terme) :

- l'évolution générale des comportements (ex : vitesses pratiquées ; taux de respect de telles consignes) ou des aptitudes (ex : effet du vieillissement?) des usagers ;
- le taux de pénétration d'une technique porteuse de sécurité (ou éventuellement d'insécurité)
- etc.

Dans certains cas, nous avons accès à des chroniques, comme celle fournie par l'observatoire des vitesses (ONISR), qui nous permettent de cerner plus ou moins précisément l'évolution jusqu'à la situation actuelle ou quasi. Mais dans beaucoup de cas, la prospective est une activité très spéculative. Pour certains facteurs, il est néanmoins possible de prédire le futur avec un niveau de précision suffisant.

Deux illustrations sont données au chapitre 6 : les vitesses pratiquées et le taux d'équipement du parc de véhicules particuliers en système de freinage ABS.

On pourrait citer d'autres exemples de facteurs pour lesquels il existe un impact significatif potentiel sur la conception : des équipements comme l'ESP, l'AFU, ou encore bien d'autres systèmes de sécurité active passive, la structure du parc, l'adhérence des chaussées...

Dans le cas où ces évolutions conduisent au constat que la fiabilité du système va très vraisemblablement (ou s'est) s'améliorer fortement, il conviendra alors de s'interroger sur la manière de « partager » ces gains :

- soit une réduction du niveau d'exigence à fiabilité constante (le bénéfice étant alors d'ordre

économique, et souvent environnemental les caractéristiques de l'infrastructure étant schématiquement<sup>24</sup> moins larges) ;

- (ii) soit un maintien du niveau d'exigence pour bénéficier au maximum des bénéfices sociaux attendus du gain de fiabilité ;
- (iii) soit une option intermédiaire entre (i) et (ii), dans un souci de compromis.

Évidemment, on peut se retrouver dans la situation inverse d'une baisse prévisible de la fiabilité, et il convient d'inverser le raisonnement.

---

24 Le propos a été volontairement simplifié à l'extrême. En matière de sécurité routière, une baisse des caractéristiques n'est pas toujours synonyme d'augmentation des risques : cas des carrefours plans, des zones urbanisées...

## 5 Classes de performance multiples pour moduler les recommandations selon le contexte

### 5.1 Problématique

L'approche conventionnelle conduit « naturellement » à un seuil unique (cf. chap. 4). Cela n'est pas systématique, mais se révèle être la règle générale avec quelques exceptions plus ou moins explicites.<sup>25</sup> Cela confère au corpus technique un caractère intangible, garantit une certaine homogénéité aux routes, idée que traduit assez bien la notion de « standard ». Évidemment, cela simplifie la compréhension et l'utilisation des recommandations techniques, mais pas forcément leur application.

En contrepartie, un tel système de règles peut manquer foncièrement de souplesse. Il peut sembler que les règles ne permettent pas de prendre en compte le contexte du projet (et des contraintes spécifiques). Cette appréciation mérite d'être nuancée, car les règles sont parfois distinguées selon le contexte comme le montre une analyse menée par le Cerema en 2013<sup>26</sup> (ex : zone de sécurité recommandée pour les routes existantes et les routes neuves). Cela revient à introduire deux limites, associées à deux niveaux de sécurité / confort, selon le contexte.

Si la limite correspond à un niveau de performance visé, un seuil unique traduit schématiquement que le même niveau de performance minimum sera donné ou du moins recherché en toute circonstance (pour un type et une catégorie de route donnés), indépendamment des conditions spécifiques d'exploitation de la voie, ou des contraintes économiques, techniques ou environnementales du projet.

Par ailleurs, les formules permettent de vérifier le respect ou non d'une situation conventionnelle, mais pas d'apprécier le niveau de performance (sécurité, niveau de service, confort) atteint : au-delà du seuil, le niveau de sécurité est jugé « bon », et en deçà « mauvais » (non satisfaisant). Lorsque pour diverses raisons, le concepteur est amené à introduire<sup>27</sup> dans le projet un écart à une règle (ou plusieurs écarts), il ne dispose guère de repères pour en apprécier les implications, le caractère raisonnable ou pas... Pour reprendre trivialement une Lapalissade bien connue : « Quand la borne est franchie, il n'est plus de limite ».

Globalement, le manque de flexibilité des règles tend à les baser principalement sur des considérations liées à la sécurité, ce qui peut conduire à rendre leur application rigoureuse particulièrement onéreuse [17].

Une fois fixée le type de voie (dans une classification) et la catégorie ou, ce qui revient souvent au même la vitesse de référence<sup>28</sup>, le travail du concepteur peut sembler se limiter – quitte à être un peu

25 Par exemple au niveau des règles de visibilité en section courante, les notions de distance d'arrêt et de distance d'évitement (celle-ci étant moins contraignantes que celle-là), ou de manière plus explicite pour la visibilité en carrefour basée sur un temps de franchissement qui renvoie à un minimum normal et à un minimum absolu. Quelques autres exemples pourraient sans doute être trouvés.

26 Dans le groupe de travail sur les fondamentaux de la conception, l'analyse des flexibilités dans les règles de l'art a permis d'établir une typologie des flexibilités. (Cerema, 2014) ; Document de travail.

27 Introduire intentionnellement, sinon cela relève d'un problème d'une autre nature.

28 Ces choix font normalement l'objet d'une décision du maître d'ouvrage sur la base d'études amont, typiquement les études

caricatural – à l'application d'un ensemble de valeurs prédéfinies (les « standards ») présentées sous la forme de recommandations s'apparentant à des « recettes de cuisine » (ibid.).<sup>29</sup>

L'idée de définir plusieurs niveaux de performance est indépendante de celle développée au chapitre 4 en réponse au questionnement des règles conventionnelles, mais elle en constitue un accompagnement logique. Elle participe du souci d'offrir une flexibilité encadrée et rationalisée, et de favoriser dans le processus de conception la mise en œuvre d'une évaluation intégrée *in itinere*.

En tout état de cause, l'introduction d'approches probabilistes est bien plus qu'un raffinement calculatoire ; il suggère un changement de principes (voire de paradigme) nécessitant de revoir en profondeur la manière d'élaborer des recommandations techniques, et en particulier de fixer des « limites », une composante souvent incontournable de règles relatives aux caractéristiques du projet.

La notion de classes (ou niveaux) de performance est particulièrement intéressante pour les routes existantes et les projets d'aménagement le concernant, qui ont deux spécificités. D'abord, les contraintes des projets sont souvent fortes et la question de la rentabilité et du compromis se posent encore avec davantage d'acuité que pour les projets d'infrastructure neuve. Par ailleurs, il s'agit de voie dont on connaît normalement les performances effectives (et les défaillances) et pour lesquelles on vise souvent l'amélioration des performances à l'atteinte d'un niveau standard apriorique. L'idée en est déjà présente dans les référentiels techniques actuels ([6], [23]...), sans que les recommandations en la matière soient très précises.

Dans le cadre d'une approche probabiliste, les niveaux de performance seront définis en termes de niveau de fiabilité, ou d'autres indicateurs similaires liés d'une façon ou une autre au risque de défaillance, voire à la gravité de ces défaillances (notion de criticité). Nous ferons l'hypothèse dans ce qui suit que les critères de performance peuvent être appréhendés en termes de fiabilité, qu'ils soient reliés à des questions de niveau de service, de sécurité, etc.<sup>30</sup>

## 5.2 Orientations

Il faut bien considérer qu'il y a d'une part la ou les grandeurs qui décrivent l'infrastructure (rayon, pente, nombre de voies, distance de visibilité, etc.), et d'autre part les performances obtenues en matière de sécurité, niveau de service, etc. (qui dépendent de ces caractéristiques et des conditions d'exploitation et de sollicitation). La démarche de définition des niveaux dépendra de l'objet de la recommandation.

Il est plus logique de définir des classes en termes de performance. Ce sera nécessaire le plus souvent, et en particulier lorsque la performance résultera de plusieurs descripteurs dont aucun n'est prépondérant.

Néanmoins, dans certains cas simples ou particuliers, il sera peut-être possible d'évaluer *a priori* plus ou moins précisément (moyennant de définir quelques hypothèses sur les conditions d'exploitation) le niveau de performance associé à une gamme de valeurs d'un descripteur de l'infrastructure. C'est en fait d'une certaine manière déjà le cas pour le nombre de voie corrélé, en section courante, assez correctement à la capacité. La comparaison avec la demande qui une variable du projet suggère très approximativement le niveau de service.

---

d'opportunité.

29 Certes, les recommandations techniques ne donnent souvent qu'un encadrement de la gamme des valeurs envisageables pour chaque caractéristique de la route.

30 Les critères de performance qui ne peuvent s'exprimer que de manière qualitative sont néanmoins exclus.

### ■ Principes sur la définition des limites

Les grandeurs relatives à un niveau de performance sont généralement des variables continues. C'est le cas de la vitesse moyenne de circulation quand il s'agit de caractériser un niveau de service circulatoire (fonction du profil en travers, longueurs des dispositifs de raccordement au niveau des échangeurs...), des sollicitations dynamiques imposées (par le tracé...). C'est surtout le cas des indicateurs de fiabilité (ou le risque de défaillance) tels que présentés dans le chapitre précédent.

#### **Définir plusieurs niveaux revient *de facto* à discrétiser une variable continue.**

Dans certains cas, les niveaux pourront être définis à partir de plusieurs variables (plus ou moins indépendantes), et il s'agira donc de partager l'espace à plusieurs dimensions (2, 3...) défini par ses variables. Dans ce qui suit, on se place dans le cas d'une seule variable, sachant que le raisonnement pourrait être étendu au cas de plusieurs variables.

La discrétisation à un caractère arbitraire. La définition de classes répond davantage à une logique pratique et opérationnelle qu'à des considérations scientifiques. Néanmoins, le choix des limites devra répondre à quelques conditions (sans doute évidentes) :

- adopter de préférence des valeurs simples, mémorisables, ce qui conduira le plus souvent à retenir soit des valeurs arrondies, soit des valeurs naturelles...
- la limite appartient à une classe et une seule. La borne inférieure de la classe sera incluse tandis que la borne supérieure sera exclue

Les limites sont choisies préférentiellement en fonction des discontinuités ou des variations rapides observées dans la fiabilité. Ces cas seront vraisemblablement minoritaires en pratique, mais pourront se rencontrer. Nous en donnons ci-après deux exemples.

On peut s'attendre que le niveau de service évolue très rapidement autour de certaines valeurs pour les largeurs de voie. Par exemple, en-deçà de certaines largeurs roulables, les véhicules ne peuvent plus se croiser sans ralentir, voire pour des valeurs plus faibles ne plus se croiser du tout. Les abaques donnant la V85 dans l'ARP, issues d'étude statistique [24] suggèrent un seuil autour de 6 mètres pour des routes bidirectionnelles à 2 voies, et inversement une variation faible du confort au-delà (à nombre de voies constant). Dans un autre registre, les évaluations statistiques menées sur des données de l'accidentologie suggèrent une variation très rapide du risque lorsque la variation de vitesse<sup>31</sup> induite par une courbe nécessite une décélération supérieure de 20 km/h ou plus [25], [26].

### ■ Sur le nombre de niveaux (ou classes)

Là encore, il n'existe pas de critère technique précis. Il s'agit de trouver un compromis entre :

- d'une part un découpage trop fin, générant un grand nombre de classes aux amplitudes peu significatives. Il paraît souhaitable que l'imprécision sur la définition d'une limite reste petite par rapport à la largeur de la classe. En effet, deux classes distinctes ont vocation à être associées à des conditions d'exploitation ou des contextes distincts (cf. illustration 5). Autrement dit, deux niveaux successifs (le milieu de deux classes successives ou les limites inférieure et supérieure d'une classe) doivent correspondre à des différences significatives, tangibles, en tenant compte qu'en matière de recommandation, ils seront par ailleurs

31 Le risque d'accident corporel est multiplié par 5,9 si la différence entre vitesses d'approche et dans le virage est supérieure à 20 km/h.



associés à des circonstances elles-mêmes sensiblement différentes.

- et d'autre part un découpage trop grossier – un trop petit nombre de classes – conduisant à une perte d'information et une schématisation extrême (le cas limite étant la situation courante actuelle à deux classes bon/mauvais).

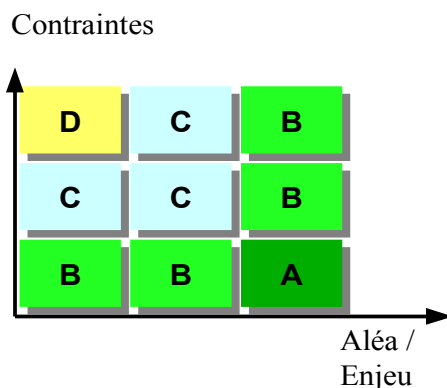


Illustration 5 : modulation des niveaux de performance en fonction des enjeux socio-techniques et des contraintes et implications du projet.

En revanche, il ne paraît pas nécessaire que les limites soient régulièrement espacées, même si cela est évidemment plus simple.

Enfin, il faut distinguer les niveaux d'usage (associés à des performances de subcritiques à excellentes) auxquels les recommandations peuvent renvoyer, des niveaux critiques qui peuvent servir seulement à qualifier la performance de situations existantes dégradées, notamment dans le cadre d'un diagnostic. Un nombre de niveaux d'usage de 3 constituera *a priori* souvent un bon compromis. Il y aura par définition au moins un niveau critique et il sera en général peu utile d'en définir plus de deux.

Niveau	A	B	C	D	E
Nom	Très élevé	Élevé	Médian	Dégradé	Très dégradé
	Niveau requis pour les situations très défavorables, mais pouvant aussi suggérer un sur-dimensionnement dans des conditions normales	Niveau requis pour les situations défavorables	Niveau adapté aux situations standard	Niveau déconseillé en règle générale, mais pouvant être envisagé sous conditions précises	Niveau à exclure. Situation à corriger en priorité pour les situations existantes.
	∞	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
	0				

Tableau 1: Exemple de définition de classes de performance

■ **Sur la définition « dénomination » des niveaux**

La définition et la dénomination des niveaux comporte un caractère arbitraire et relatif, mais peut avoir une influence sur la philosophie des règles de l'art qui leurs sont associées.

Schématiquement, on trouve généralement (et souvent implicitement) un niveau « bon ». C'est celui qu'il faut chercher à atteindre par défaut. Les autres niveaux – quand ils sont définis – correspondent à des modes *a priori* dégradés, acceptables sous certaines conditions (d'implication économique rédhibitoire, de mesures d'accompagnement...). Le niveau « bon » est donc supposé être adapté non seulement aux conditions normales d'exploitation, mais aussi aux conditions défavorables, ce qui suggère que ce niveau comporte une « marge de sécurité » importante, voire superflue dans nombre de situation

Exemple : les besoins de perception des carrefours giratoires [23] sont très importants dans certaines conditions défavorables de tracé et de vitesse d'approche, de contexte (caractère isolé sur la voie, fonction de la voie...), ou de la configuration de la route (3 voies ou 2x2 voies), tandis qu'ils sont à l'inverse nettement plus modéré lorsque les vitesses d'approche sont de facto modérées, ou d'une forte prévisibilité (traitement homogène des divers carrefours d'une même section...). Ils dépendent aussi des caractéristiques intrinsèques adoptées pour le giratoire (îlot, mise en lumière...).[27] L'absence d'évaluation fine et sérieuse, intégrée au processus de conception<sup>32</sup>, voire directement aux référentiels techniques permet difficilement de moduler les recommandations.

Ce constat conduit à formuler l'idée alternative de définir a minima :

- un niveau « normal »<sup>33</sup> ou « médian » adapté aux circonstances courantes, récurrentes,

Il devrait pouvoir être vérifié dans la majorité des cas. Il correspond *a priori* à un niveau de performance normal sans précaution ou disposition spécifique particulière, au-delà du respect des diligences normales.

- un niveau de performance élevé,

Il est adapté à des circonstances particulièrement défavorables concernant le contexte de l'aménagement ou de la composante, les conditions d'exploitation : nature et importance du trafic... ;

le recours à un niveau de performance élevé n'est normalement pas requis dans une situation standard, surtout si cela devait conduire à surdimensionner l'infrastructure.<sup>34</sup> Par exemple, la distance de visibilité est réputée influencer sur le niveau de confort. Les recommandations actuelles comportent déjà des recommandations dans ce sens pour le dimensionnement des giratoires [23].

- un niveau de performance dégradé, acceptable sous certaines conditions opérationnelles ;

Le niveau de performance est objectivement moins bon en moyenne que celui requis dans le cas général. Il peut néanmoins rester admissible sous-réserve de conséquences très significatives pour le projet considéré, et surtout de précautions (à décrire dans le référentiel technique), notamment des mesures d'accompagnement au niveau de la conception ou de l'exploitation (réduction de vitesse limite localisée, système d'alerte dynamique, surveillance, etc.).

32 Sauf dans une certaine mesure au stade du contrôle externe ou extérieur, mais cette phase arrive souvent un peu trop en aval pour favoriser une optimisation du projet.

33 L'utilisation de ce qualificatif peut questionner, suggérant que des niveaux inférieurs son a-normaux.

34 On retrouve une logique similaire dans les règles en matière de capacité des giratoires (ACI).

Les référentiels techniques actuels comportent quelques exemples de règles qui sont associées plus ou moins explicitement à des niveaux différents mais avec des principes hétérogènes. Il serait sans doute excessivement et inutilement lourd de structurer l'ensemble des recommandations techniques selon ces divers niveaux ; les enjeux économiques, environnementaux ou techniques ne le justifient pas. En revanche, pour les règles qui le sont, une certaine homogénéité est requise pour en faciliter la compréhension et l'utilisation.

Il est toujours possible dans le cadre d'une évaluation de la performance d'une infrastructure (projet ou voie existante) de revenir à une échelle continue, et un calcul plus précis des indicateurs, lorsque la discontinuité inhérente à la création d'une échelle risque de conduire à des effets pervers.

## 6 Exemple de la distance de visibilité

L'utilisation de l'approche probabiliste, typiquement avec des méthodes de simulation de Monte-Carlo, fait l'objet de quelques publications assez récentes sur le sujet. C'est en particulier le cas pour la visibilité [28], [18], [13], [29]. En effet, ce sujet s'y prête assez bien pour diverses raisons : il est « conventionnel » à plusieurs titres (cf. chap. 4.1.), les connaissances sur le sujet sont suffisamment développées pour mettre en œuvre des méthodes probabilistes, et le nombre de paramètres et variables à prendre en compte est important.

Le modèle développé par l'auteur dans la référence [13] a été actualisé dans le cadre de la réflexion sur la révision des fondamentaux de la conception<sup>35</sup> ; les travaux sont indépendants de l'opération SERRES, mais ils nous serviront ici d'illustration.

### 6.1 Présentation du modèle

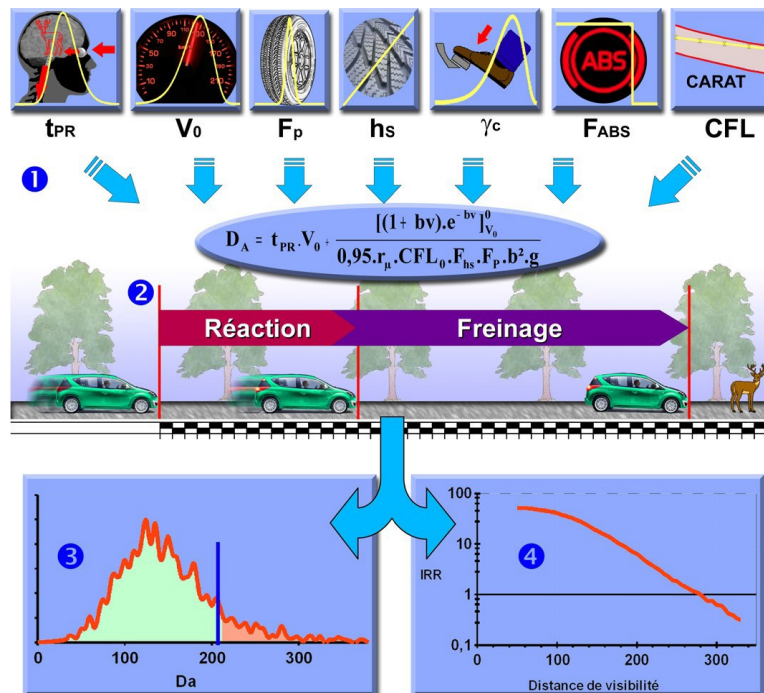


Illustration 6: Approche probabiliste - cas de la distance d'arrêt[29].

Le schéma ci-dessus illustre la démarche. Un modèle pour la distance d'arrêt ( $D_a$ ) des véhicules légers (2) sur chaussée mouillée est constitué à partir de la littérature et de bases de données. Il prend en compte les principaux paramètres d'influence, tels que le temps de perception réaction, les vitesses pratiquées, l'état et les caractéristiques des pneumatiques, le type de système de freinage, etc. Une distribution réaliste des distances d'arrêt (3) en est déduite par une simulation de Monte-Carlo. La

35 Sous le pilotage de la Direction technique ITM du Cerema, et pour le compte de la DGITM/DIT/MARRN.

comparaison des distances d'arrêt obtenues avec la distance de visibilité offerte permet d'inférer sur le niveau de risque (4) plusieurs indicateurs de risque sont proposés pour la visibilité, à destination des gestionnaires ou pour un profil d'utilisateur particulier.

L'étude combine un modèle théorique et des mesures *in situ* ; pour caler mais surtout pour valider le modèle.

La formulation générale donnant la distance d'arrêt (notée  $D_A$ ) est donnée par l'équation (V).

$$D_A = t_{PR} V_0 + \frac{1}{g} \int_{V_0}^0 \frac{v}{\gamma(v) + p} dv \quad (V)$$

avec :  $t_{PR}$  : distance de perception-réaction

$V_0$  : vitesse initiale, en m/s ;

$p$  : la déclivité, en valeur algébrique ;

$\gamma(V_0)$  : la décélération instantanée, et exprimée en fraction de  $g$  ( $= 9,81 \text{ m/s}^2$ ).

Le second membre de l'équation correspond à la distance de freinage. Les principales originalité et difficulté tiennent à la détermination de la décélération effective ( $\gamma$ ) du véhicule, en tenant compte simultanément de l'adhérence mobilisable ( $\mu$ ) et de l'aptitude du conducteur à la mobiliser ( $\gamma_{cond}$ ). Il est apparu nécessaire de distinguer deux cas selon que le véhicule est équipé ou non de l'ABS, car le système de freinage influe non seulement sur l'adhérence mobilisable [30] mais aussi sur la décélération admissible par les conducteurs [31], [32], [33].

La décélération  $\gamma$  est schématiquement déterminée comme suit :

- elle est égale à l'aptitude du conducteur à freiner en urgence, dans la limite du niveau permis par l'adhérence ( $\mu$ ), soit  $\gamma = \inf(\mu ; \gamma_{cond})$  ;
- $\mu$  est défini à partir du modèle de *Pacejka* [30] faisant intervenir le taux de glissement. Ainsi, avec l'ABS  $\mu = 0,95 \cdot \mu_{max}$ , sinon  $\mu = \mu_{bloq}$  (freinage roues bloquées) ;
- $\mu_{bloq}$  est fonction de la hauteur d'eau, de l'état des pneumatiques et du CFL ;
- Le CFL dépend de la vitesse (et varie donc lors du freinage) et du type de revêtement. On adopte pour CFL( $v$ ), le modèle du type *Pennsylvania Transportation Institute* :  $CFL(v) = CFL_0 \cdot e^{bv}$ . Les paramètres du modèle sont obtenus par échantillonnage de données de la base CARAT, jugées représentatives de la situation française (à ce sujet, voir § 6.2.).
- $\mu_{max}$  est calculé à partir de  $\mu_{bloq}$  et du ratio  $R_\mu$  entre ces deux paramètres.

Les paramètres ( $v$ ,  $\gamma_{cond}$ ,  $h_S$ ,  $R_\mu$ ,  $F_{ABS}$ ...) sont déterminés à partir de distributions statistiques tirées de la littérature [34], [30], [35].

Le modèle pour  $D_A$  s'écrit alors (dans le cas d'une pente nulle)<sup>36</sup> à partir de l'équation (V) et après intégration :

36 Le cas d'une pente non nulle peut être pris en compte par le modèle mais nécessite de compliquer les formules et ne sera pas présenté ici. Dans l'équation V, on peut par exemple utiliser le développement limité pour l'intégrale ( $1/(1+x) \approx 1-x+1/x^2...$ ), avant d'intégrer, en considérant que  $p$  reste petit devant  $\gamma$ .

$$D_A (\text{sans ABS}) = t_{PR} \cdot V_0 + \frac{[(1 + bv) \cdot e^{-bv}]_{V_0}^0}{CFL_0 \cdot F_{hs} \cdot F_p \cdot b^2 \cdot g} \quad (VI)$$

$$D_A (\text{avec ABS}) = t_{PR} \cdot V_0 + \frac{[(1 + bv) \cdot e^{-bv}]_{V_0}^0}{0,95 \cdot R_\mu \cdot CFL_0 \cdot F_{hs} \cdot F_p \cdot b^2 \cdot g} \quad (VII)$$

Des précisions sur les méthodes, données, sources de constitution du modèle sont données dans les références [13] [36]

### 6.1.1 Prise en compte de l'offre

Sarhan et Hassan [18] ont également élaboré un modèle probabiliste pour la visibilité, plus simple pour la caractérisation de la demande, mais étendant le caractère probabiliste à la caractérisation de l'offre de visibilité (qui varie selon les usagers, et surtout selon le lieu).

Dans les cas étudiés avec le modèle *supra*, le problème a pu être simplifié pour des raisons pratiques [13]. L'incertitude sur l'offre est considérée comme un paramètre fixe, ou ce qui revient quasiment au même comme négligeable par rapport à l'incertitude sur la demande. La simplification n'est pas d'ordre mathématique (l'approche ne change pas fondamentalement, et les équations et modèles de la théorie de la fiabilité sont spécifiés pour intégrer cette dimension) ; elle est plutôt d'ordre documentaire. Il convient en effet de disposer des éléments nécessaires pour spécifier correctement cette offre de service.

Dans l'étude [36], relative à la visibilité sur autoroutes, les résultats obtenus en considérant ou non l'incertitude sur l'offre ont été comparés en distinguant les situations en courbe à gauche, courbe à droite et angle saillant. Il ressort dans ce cas que la prise en compte de l'incertitude peut conduire à des évaluations du niveau de fiabilité assez différentes.

Dans certains domaines (l'ingénierie du trafic), l'incertitude sur l'offre est manifestement non négligeable face à celle de la demande. Dans le cas de la visibilité, Sarhan et Hassan ont intégré cette dimension. Dans ce domaine (la visibilité géométrique, il est nécessaire de constituer un modèle géométrique 3D [37], ou de distinguer simultanément (mais de manière moins précise) les offres de visibilité horizontales et verticales. Pour cette dernière, l'incertitude est liée conjointement à la nature / hauteur de la cible, et à la position / hauteur de l'œil.

## 6.2 Prise en compte de facteurs variables

Comme exposé au chapitre 4, il est très utile et instructif de disposer d'une vision rétrospective et prospective. Cela nécessite de disposer pour chacun des facteurs intervenant dans le modèle (équations VI/VII) d'informations sur leur distribution. En fait cela revient à établir un modèle pour chaque année caractéristique de la période d'étude. En pratique, on s'intéresse surtout aux facteurs qui sont associés à une forte dynamique et à ceux pour lesquels le modèle est très sensible.

Pour le cas de la visibilité, le taux d'équipement du parc automobile en ABS et la vitesse pratiquée par les véhicules particuliers sont des paramètres associés à une forte dynamique, mais aussi des paramètres pour lesquels les indicateurs de risque et de fiabilité sont très sensibles.

## 6.2.1 Taux d'équipement en ABS

L'évolution du taux d'équipement en ABS du parc VP a été modélisée dans [36] à partir du nombre de mises en circulation annuelles sur la période d'étude, du taux de survie des véhicules en fonction de leur ancienneté, du taux d'équipement en ABS des véhicules selon leur année de mise en circulation, et enfin, du kilométrage annuel moyen des véhicules – notion de parc roulant – en fonction de leur ancienneté.

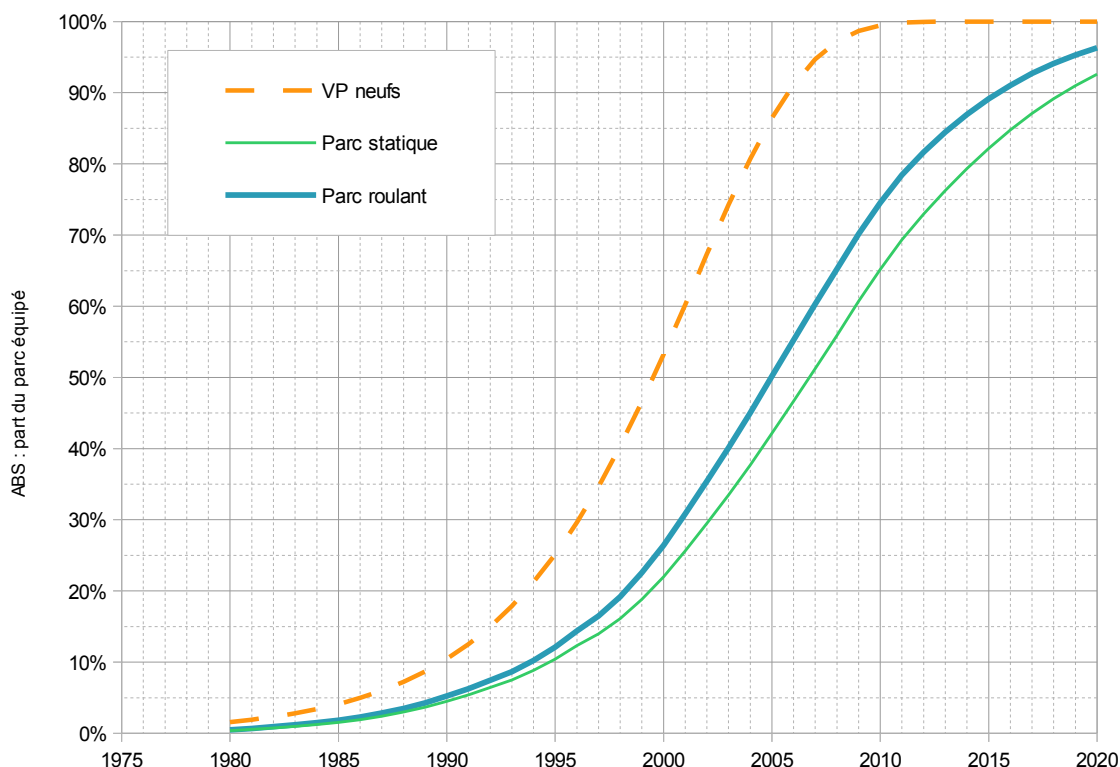


Illustration 7: Simulation du taux de pénétration de l'ABS dans le parc VP. Evolution de 1980 à 2020 (Patte, 2014).

La modélisation décrite ci-dessus permet d'accéder pour chaque année de la période d'étude à une estimation du taux d'équipement du parc automobile (VP), valeur qui pourra être injectée dans le modèle de risque sur la visibilité décrit ci-dessus afin de rendre compte de l'amélioration des performances des VP. L'évolution de ce taux peut même être extrapolée en formulant des hypothèses sur l'évolution du nombre annuel d'immatriculations et sur le vieillissement du parc VP. Une analyse de sensibilité suggère que l'incertitude sur les résultats obtenus sur la période 2012-2020 est faible.

## 6.2.2 Vitesses pratiquées

L'évolution des vitesses pratiquées peut être appréhendée directement à partir des données de l'observatoire des vitesses de 1992 à 2012.

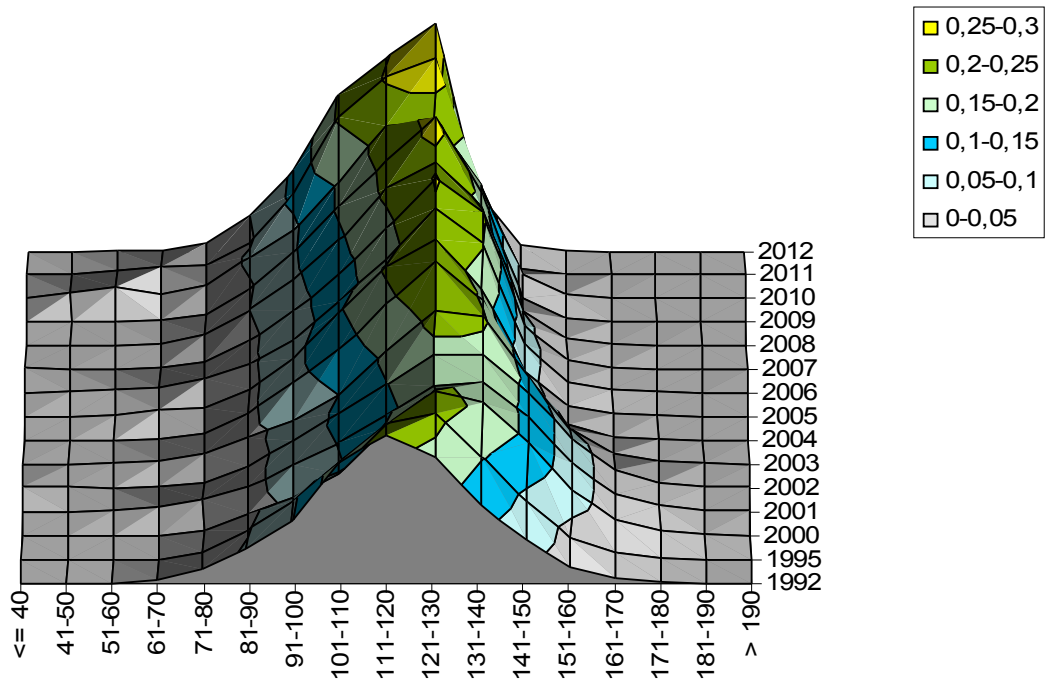


Illustration 8: Evolution de la distribution des vitesses pratiquées sur autoroute de liaison (France entière) (ONISR)

L'ajustement d'une distribution de type gamma sur les données empiriques permet une utilisation aisée dans la modélisation de Monte-Carlo relative au calcul de la distance d'arrêt.

## 6.3 Résultats

Le cas modélisé est celui emblématique des autoroutes de liaison. Les recommandations techniques en vigueur sur les autoroutes de liaison sont fixées par l'ICTAAL en 2000 [8]. La valeur de référence pour la distance d'arrêt en palier est de 280 m pour 130 km/h.

Une modélisation de Monte Carlo a été réalisée avec le modèle présenté suivant les principes exposés ci-avant. Divers jeux de paramètres ont été utilisés, pour appréhender l'évolution de la fiabilité dans le temps, de manière rétrospective et prospective. Les paramètres de chaque jeu sont indépendants les uns des autres. Les jeux sont différents pour chaque année modélisée.<sup>37</sup>

37 Ils diffèrent sur les paramètres liés à la vitesse, au taux de pénétration de l'ABS. Les paramètres relatifs à l'adhérence sont stables, mais les évolutions de vitesse et de système de freinage conduisent à des distributions d'adhérence mobilisable variables dans le temps.



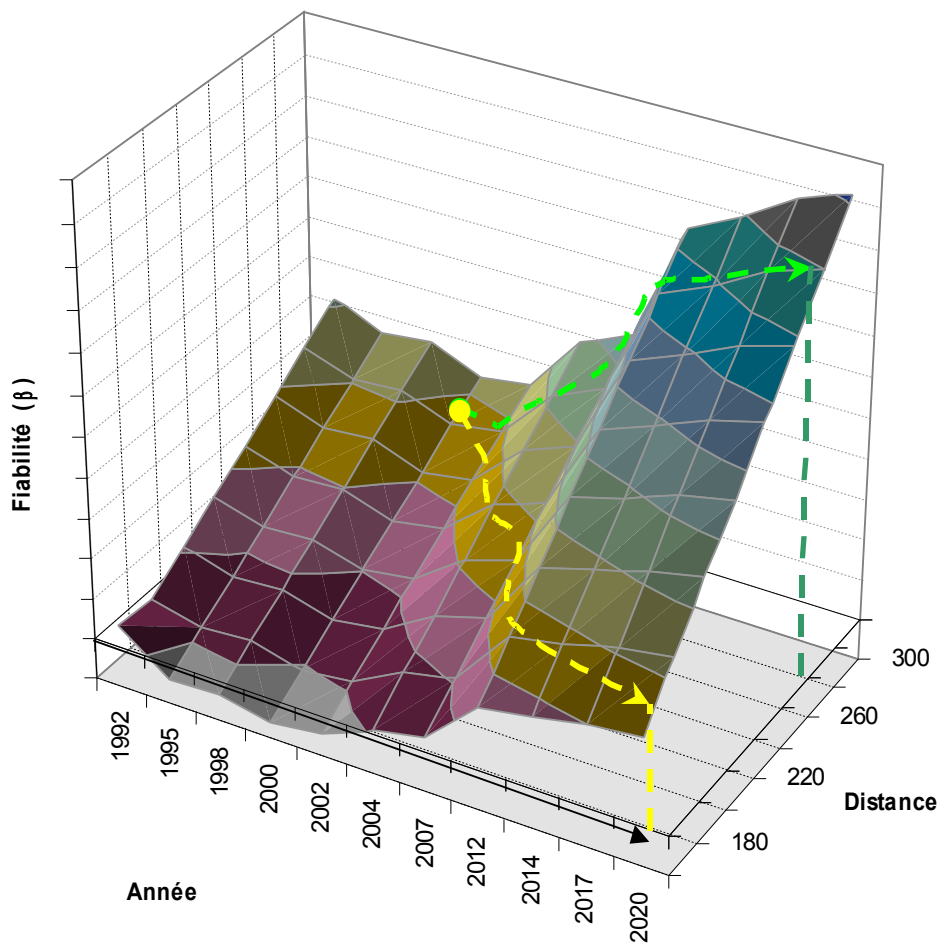


Illustration 9: Evolution de la fiabilité en matière de distance de visibilité sur obstacles (autoroutes de liaison)

Cette figure indique d’abord que la fiabilité croît fortement, et de manière à peu proportionnelle à la distance de visibilité offerte (nous rappelons que le risque de défaillance lui ne varie pas linéairement avec la fiabilité). La figure suggère aussi que la fiabilité (en matière de visibilité) a évolué fortement entre 1992 et 2012. Elle paraît avoir atteint un minimum en l’an 2000, alors que les vitesses pratiquées sur autoroute étaient les plus élevées jamais mesurées (la V85 approchait 150 km/h). La fiabilité a ensuite fortement cru en rapport avec la forte baisse des vitesses et dans une moindre avec l’augmentation du taux d’équipement en ABS. Elle devrait continuer à croître jusqu’en 2020 avec la généralisation de l’ABS (et sous l’hypothèse d’une stabilisation des vitesses). En résumé, pour une distance de visibilité offerte donnée, la fiabilité croît entre 2000 et 2020 (courbe verte sur la figure 9).

On peut aussi interpréter la figure suivant les courbes de niveau ; la distance de visibilité offrant un niveau de fiabilité donné baisse fortement entre 2000 et 2020 (courbe jaune sur la figure 9). En 2020, la distance de visibilité offrant le même niveau de fiabilité que la distance conventionnelle assurait en 2000 est inférieure à 200 mètres.

## 6.4 Niveaux de performance

Plusieurs niveaux de performance sont définis suivants les principes présentés au chapitre 5. La situation considérée est l'année 2020.

Un niveau donné peut être défini de manière absolue, sur la base d'un niveau de fiabilité ou, ce qui est plus intuitif, un risque de défaillance. Il peut aussi être défini de manière relative, par rapport à une situation connue, par exemple le niveau de fiabilité lors de l'établissement des recommandations en vigueur : 2000 pour ce qui concerne l'ICTAAL, ou 1998 si l'on retient non pas la date de publication, mais la date d'élaboration de la règle (et des données et connaissances pries en compte).

Par exemple, on peut définir un niveau médian (C) comme assurant un risque de défaillance de 2 % (correspondant à une valeur de  $\beta$  de 2,5 environ) et un risque de défaillance grave de 1 % dans les conditions de 2020. La distance de visibilité requise pour atteindre ce niveau C serait alors de 210 m environ, soit 75 % de la valeur conventionnelle (280 m). Ce niveau offre alors un niveau de sécurité 5 fois meilleur dans les conditions de 2020, que le niveau conventionnel dans les conditions de 1998.

Il pourrait éventuellement être considéré comme un niveau de performance intéressant, offrant conjointement un niveau de fiabilité objectivement correct (le niveau de fiabilité des autoroutes du point de vue de la visibilité n'a jamais été contesté, y compris à la fin des années 90), nettement meilleur que celui admis dans les recommandations en vigueur – certes implicitement – tout en permettant de réduire très sensiblement les contraintes de conception.

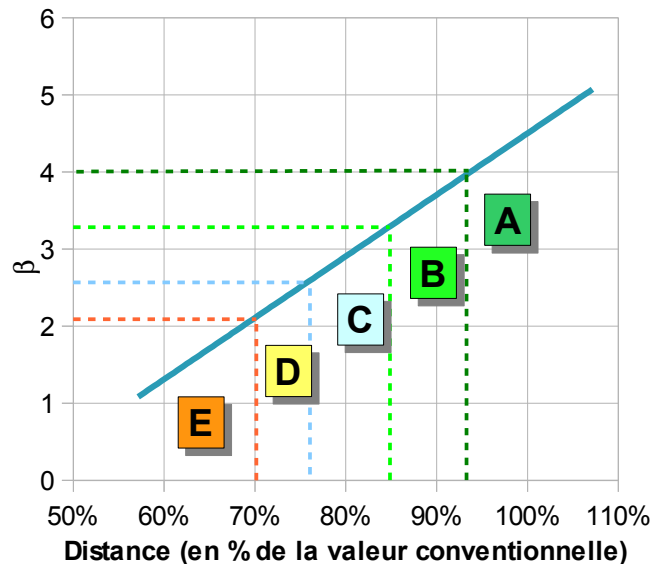


Illustration 10: Exemple de définition de niveaux de performance

Dans la figure ci-dessus, plusieurs niveaux de fiabilité sont définis, et les valeurs correspondantes en matière de visibilité sont exprimées en pourcentage de la valeur conventionnelle. Ces valeurs sont établies pour le cas des autoroutes, mais il est probable qu'une modélisation adaptée aux conditions d'autres types d'infrastructures (routes principales bidirectionnelle, voies structurantes

d'agglomérations...) donne des ordres de grandeurs similaires.

## 7 Conclusions et recommandations

Le rapport traite des modalités de définition et d'élaboration des règles de l'art en matière de conception des infrastructures routières. Il s'agit en effet d'induire des changements significatifs et effectifs dans les caractéristiques géométriques des projets, que ce soit par des règles plus rationnelles et, dans la mesure du possible, moins conséquente, mais aussi avec des possibilités d'application plus flexible.

Les principaux bénéfices directs ou indirects attendus sont notamment un gain au niveau des vitesses pratiquées (modération), une réduction des nuisances, une réduction des impacts permanents et irréversibles liés à la réalisation ou l'aménagement, une meilleure rentabilité des projets d'aménagement.

La démarche s'inscrit globalement dans une réflexion sur les verrous d'exploitation à la mise en œuvre de nouveaux concepts et démarches (comme « RACA »). Relâcher les contraintes dans certains domaines de la conception peut servir globalement à l'élaboration de nouvelles recommandations, voire à un nouveau paradigme en matière de conception routière.

Il s'agit également de « désacraliser » les règles, responsabiliser davantage les acteurs (maître d'ouvrage, BE, contrôleurs...), sans réduire l'importance à apporter à la qualité technique des projets.

Le rapport s'appuie sur une analyse approfondie des règles de l'art et de leur logique, de leurs forces et de leurs faiblesses. Des exemples concrets attestent du caractère opérationnel des approches théoriques et générales développées. Les réflexions et analyses développées dans ce rapport conduisent à formuler plusieurs recommandations pour faire évoluer les modalités de définition des recommandations en matière de conception et d'aménagement des voiries.

### R1. Améliorer l'encadrement des valeurs

Si l'analyse des référentiels techniques en matière de conception montre que l'encadrement des valeurs existe déjà, diverses améliorations formelles pourraient être facilement apportées pour valoriser un principe qui sert surtout à encadrer le comportement attendu de l'utilisateur. En effet, les moyens d'encadrer une caractéristique de l'infrastructure sont assez diversifiés, hétérogènes, souvent peu explicites, voire lacunaires. L'analyse conduit surtout à faire émerger le besoin d'évaluation itinéraire (voir R4.).

### R2. Introduire des approches probabilistes dans le cadre de la théorie de la fiabilité.

L'utilisation d'approches probabilistes dans le cadre de la théorie de la fiabilité constitue une approche prometteuse, comme alternative aux approches déterministes. Elle devrait permettre de réduire le caractère conventionnel des règles actuelles, de cerner les marges de sécurité effectives qu'elles comportent, mieux prendre en compte les aspects économiques et intégrer les conditions d'exploitation. En pratique, elles permettent d'envisager la redéfinition de certaines règles pour les rendre plus pertinentes, souvent moins contraignantes, et de mieux cerner le niveau de fiabilité offert.

La révision des règles en matière de distance de visibilité en section courante sert d'illustration aux concepts que nous avons explorés. Les modèles probabilistes existant en la matière suggèrent que, dans les cas courants, il devrait être possible de relâcher sensiblement les contraintes en matière de distance de visibilité dite « sur obstacles » (de 20 à 25% environ). Le cas échéant, il devrait en découler des implications en chaîne : baisse des valeurs recommandées en matière de rayon en angle

saillant (qui varie avec le carré de la distance de visibilité), baisse des dégagements latéraux requis en courbe (*idem*), baisse du confort à niveau de fiabilité maîtrisé, baisse très nette des coûts de construction et des implications environnementales. Voire une réduction du nombre de dérogations. En tout état de cause, de tels modèles permettent de cerner le niveau de fiabilité d'un projet donné et peuvent servir à vérifier la pertinence d'une dérogation.

D'autres exemples d'utilisation que celui de la visibilité peuvent être évoqués : les règles d'enchaînement des éléments du tracé, les largeurs des voies de circulation, les largeurs d'accotement, les règles d'implantation des VSVL dans les rampes ou les descentes, etc.

Ces réflexions apportent les bases théoriques et méthodologiques pour réviser nombre de règles techniques parfois jugées intangibles. Elles devraient contribuer à apporter plus de flexibilité et de cohérence, améliorer la rentabilité socio-économique des projets, les projets neufs comme la modernisation ou requalification des infrastructures existantes, tout en donnant des garanties pour maîtriser la sécurité ou plus largement la performance des infrastructures aménagées.

### R3. Définir plusieurs niveaux de performances / modularité des règles

L'utilisation d'approches non conventionnelles suggère par ailleurs de définir plusieurs niveaux de performance ou, ce qui revient au même, plusieurs seuils, plutôt qu'un seuil unique et intangible. Les recommandations techniques pourraient alors définir un niveau de performance minimal à atteindre adapté selon la situation (niveau d'exposition au risque, le degré de contrainte économique, environnemental ou technique du projet...). Le rapport donne des orientations pour la définition de tels niveaux.

### R4. Développer l'évaluation *in itinere* fonctionnelle et comportementale

Conjointement aux recommandations R1, R2 et R3, les analyses conduisent à faire émerger le besoin mais aussi les possibilités d'évaluation *in itinere* fonctionnelle et comportementale – le comportement dont il est question est celui du système étudié dans son ensemble pas (seulement) celui des usagers. Un ensemble de limites à ne pas dépasser n'apporte pas forcément les garanties suffisantes d'atteindre les objectifs en matière de fonctionnement du système et en particulier de comportement des usagers. Si quelques processus de cette nature sont esquissés dans les « normes » actuelles, ils mériteraient d'être renforcés et étendus.

Il ne faut pas négliger les gisements associés aux interactions entre les règles techniques relatives aux caractéristiques des infrastructures d'une part et les processus d'évaluation de la performance (dont les comportements) obtenue.

## Bibliographie

- [1] Guyot, R., Gisements de sécurité routière. Paris : Ministère de l'équipement, DRAST, 2002.- 2 vol., 2002.
- [2] CEMT, La gestion de la vitesse. OCDE., 2007.
- [3] Evans, C., Greenhouse Gas Abatement Potential in the Australian Transport Sector. Route-Roads, 2013 n°358, 2013.
- [4] Patte, L., Sujet 4.1 : Nouvelles solutions pour une conception innovante des voirie. Enjeux et gisements, 2011.
- [5] ONISR, La sécurité routière en France. Bilan. Bilan de l'accidentalité de l'année 2012., 2013.
- [6] Sétra, Aménagement des Routes Principales [A.R.P.] – Instruction sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Routes Nationales [I.C.T.A.R.N.] – Circulaire du 5 août 1994, 1994.
- [7] Sétra, DGR, Actes du colloque «la route autrement» du 9 mars 2006 , 2006.
- [8] Sétra, Instruction sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Autoroutes de Liaison », Circulaire de la direction des routes du 12 décembre 2000, Bagneux., 2000.
- [9] Cetur, Instruction sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Voies Rapides Urbaines, Lyon., 2011.
- [10] Highway Agency, Design Manual for Roads and Bridges TD 9/93 (DMRB), 2002.
- [11] Sétra, Sécurité des routes express, 2001.
- [12] CETU, RECTUR. Recommandations pour la conception des tunnels à gabarit réduit, 199\*.
- [13] Patte, L., Évaluation du risque en relation avec la visibilité - Proposition d'indicateurs de risque pour la visibilité », CETE Méditerranée, Aix-en-Provence., 2009.
- [14] Sétra, Paysage et lisibilité de la route – éléments de réflexion pour une démarche associant la sécurité routière et le paysage, 2006.
- [15] Certu, Voies Structurantes d'Agglomération Conception des artères urbaines à 70 km/h, 2012.
- [16] C.E., Accord européen sur les grandes routes de trafic international (AGR), conclu à Genève le 15 novembre 1975. Texte consolidé du 14 mars 2008, 2008.
- [17] Hirsch, M., Praschker, J., Ben-Akiva, M., New Stochastic Approach to Geometric Design of Highways. Institute of Transportation Studies, University of Carolina, Irvine, 1985.
- [18] Sarhan, M., Hassan, Y, Three Dimensional, Probabilistic Highway Design : Sight Distance Application, TRB 2008 Annual Meeting, Washington, 2007.
- [19] Zwingmann, X., Modèle d'évaluation de la fiabilité et de la maintenabilité au stade de la conception. Thèse de doctorat. Université Laval, Québec ; Université Louis-Pasteur, Strasbourg., 2005.
- [20] Sétra, Théorie de la fiabilité. Application à l'évaluation structurale des ouvrages d'art. Rapport d'études., 2012.
- [21] Zheng, titre, 1997.
- [22] Zwingmann, X., Modèle d'évaluation de la fiabilité et de la maintenabilité au stade de la conception. Thèse de doctorat. Université Laval, Québec ; Université Louis-Pasteur, Strasbourg., 2005.

- [23] Sétra, Aménagement de carrefours interurbains - Carrefours plans, 1998.
- [24] Gambard JM, Louah G, Vitesses pratiquées et géométrie de la route. Rapport d'étude. Sétra., 1986.
- [25] Fluteaux, Etude de la base Virage ; rapport technique. Cete Normandie-Centre, 1997.
- [26] Labaye, Y., Modélisation de l'insécurité routière en virage : mise en place d'une méthodologie opérationnelle d'application du modèle linéaire généralisé ; rapport de stage Mastère ENSAI., 1997.
- [27] Patte, L., Perception des giratoires - Contribution à l'évaluation de l'impact de l'environnement visuel sur la conduite, à partir d'observations in situ et de l'analyse détaillée d'accidents : cas des giratoires. LREP., 2004.
- [28] Sétra, Le livre du maître - Justifications de l'ICTAAL – Chap. 2 Visibilité , Sétra, Bagnaux, 2002.
- [29] Patte, L., Evaluation du risque en relation avec la visibilité - proposition d'indicateurs de risque. Actes du colloque Prévention des risques et aides à la conduite; 4&5 mai 2010, pp.65-74, Paris., 2010.
- [30] Delanne, Y., Potentiel d'adhérence du couple pneumatique/chaussée. V2.0, LCLC, Nantes., 2005.
- [31] Mavromatis, S., Psarianos, B., Kasapi, E., computational Determination of Passenger Cars' Braking Distances Equipped with Anti-block Brake Systems, 3rd International Symposium on Highway Geometric Design, 29 juin – 1er juillet., 2005.
- [32] Kudarauskas, N., Analysis of Emergency Braking of a vehicle. Transport, 2007, Vol XXII, No 3, 154–159., .
- [33] Greibe, P., Determination of Braking Distance and Drivers Behavior Based on Braking Trials », Transportation Research Board 2008 Annual Meeting, Washington., 2008.
- [34] Unifi, TRL, Cete de Lyon , VERT. Vehicle Road Tyre Interaction: Full Integrated and Physical Model for Handling Behaviour Prediction in Potential Dangerous Situations , Contract N°: BRPR-CT97-0461., 2000.
- [35] UTAC, Contrôle technique périodique des véhicules légers. Rapport d'activités annuel. État du parc automobile national. 2007, Montléry, 2008.
- [36] Charbonnier, P., Mesure de distance de visibilité géométrique par modèles 3D, 2011.
- [37] Patte, L., Fondamentaux de la conception routière - Révision des règles de visibilité et de calcul de la distance d'arrêt, Mai 2014 (provisoire).



Connaissance et prévention des risques - Développement des infrastructures - Énergie et climat - Gestion du patrimoine d'infrastructures  
Impacts sur la santé - Mobilités et transports - Territoires durables et ressources naturelles - Ville et bâtiments durables

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement  
Direction Territoriale Méditerranée - Pôle d'activités 30 Avenue Albert Einstein - CS 70499 - 13593 AIX-EN-PROVENCE Ccedex 3 - Tél : +33 (0)4 42 24 76 76  
Siège : Cité des Mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél : +33 (0)4 72 14 30 30 - [www.cerema.fr](http://www.cerema.fr)