

1.1. ESTIMATION DU TEMPS DE TRAJET LORS DE L'APPROVISIONNEMENT DES MATERIAUX SUR UN CHANTIER

L'approvisionnement commence par le mapping des fournisseurs autour de la zone du chantier suivant les critères recherchés, lequel aboutit au choix du fournisseur répondant aux attentes du client. Puis, les diligences liées au traitement de la commande sont effectuées. Au moment d'effectuer la livraison des matériaux, le véhicule prend la route et aborde le trajet avec une certaine vitesse V . Au cours du trajet, les caractéristiques du circuit d'approvisionnement reliant le fournisseur et le chantier en termes de conditions de la route, de conditions météorologiques et de circulation ont un impact sur ce dernier, lequel se traduit par la modification de ses variables notamment la vitesse de parcours et par conséquent le temps de transport.

Cette partie s'attèle à effectuer une modélisation de ce temps de transport autour des étapes que sont la mise en place d'un graphe de voies associées au circuit d'approvisionnement, l'estimation du temps de trajet sur un arc de parcours, et enfin l'agrégation des différents arcs pour ressortir l'itinéraire optimal du graphe.

1.1.1. Graphe de voies associées au circuit d'approvisionnement

Soit F_i le point de départ « fournisseur » et PC le point d'arrivée « chantier », le graphe des voies associées au circuit d'approvisionnement est obtenu à l'issue d'un prétraitement effectué à partir des logiciels de cartographie Google Earth et QGis. Il permet de ressortir toutes les différentes options de parcours possibles. Les sommets de ce graphe sont les différentes intersections identifiées et les arcs les différents parcours. Il s'agit d'un graphe orienté noté $G = (X, U)$ où $X = \{x_i, i = 1, 2, \dots, n \in \mathbb{N}\}$ et $U = \{U_{pq}, p, q = 1, 2, \dots, n \in \mathbb{N}\}$, A_{pq} étant l'arc de parcours entre deux sommets x_p et x_q , p et q étant des valeurs quelconques de i .

1.1.2. Estimation du temps de trajet sur un arc de parcours

Pour déterminer le temps de trajet sur un itinéraire, il est important d'effectuer une décomposition de celui-ci en tronçons homogènes et de procéder à une caractérisation de ces derniers. Ce découpage consiste à la délimitation des tronçons à partir des points de référence

comme un changement de type de route, de type de revêtement, de l'état de la route, un passage sur un pont ou un dalot, un changement de pente. L'intérêt de procéder à cette opération est la possibilité qu'un arc de parcours puisse être hétérogène le long du trajet.

1.1.2.1. Description des paramètres caractéristiques du trajet

Les paramètres caractéristiques d'un trajet dépendent du mode de transport employé. Dans le cas d'un approvisionnement local, sur lequel s'appuie notre étude, le mode de transport fréquemment utilisé est le transport routier, support essentiel à la croissance des pays. Ainsi on note :

i. L'état de la route

Selon le critère technique (mode d'exécution des travaux de construction ou d'entretien), on distingue les chaussées suivantes :

- **Piste naturelle** : il n'y a pas de chaussée véritable, ni d'aménagement sur la voie. La circulation se fait à même le sol naturel, et suit le tracé le moins mauvais ouvert par les véhicules précédents. Difficilement praticable en saison de pluie, cette catégorie de route qui prend souvent le nom de piste est saisonnière, est principalement retrouvée dans les zones reculées du pays ;
- **Route en terre** : il s'agit d'une route dont la couche de roulement est en matériaux sélectionnés et dûment aménagée avec des ouvrages d'assainissement. Elle est capable d'assurer une circulation permanente dans les conditions décentes ; c'est-à-dire le confort, la sécurité, la vitesse de circulation sont acceptables et la praticabilité n'est interrompue qu'exceptionnellement ;
- **Route revêtue** : c'est une route dont la couche de roulement est en béton bitumineux (chaussées souples) ou en béton compacté au rouleau (chaussées rigides), ou en pavés.

Les caractéristiques intéressantes d'une route lors d'un trajet sont sa capacité et son état de dégradation. Sa capacité d'écoulement est la quantité de véhicules qu'elle peut transiter en condition de circulation normale, dépendamment de ses caractéristiques géométriques. Elle est déterminée en attribuant une capacité de $C_0 = 200$ UVP par mètre de largeur de chaussée revêtue

(CETUR, 1986) : $C = C_0 \times \text{largeur}$. Tenant compte de l'occupation d'une partie de route due aux activités humaines (commerciales...), un coefficient de réduction k de la capacité de la route permettant de traduire cette réalité est défini par :

$$k = \text{largeur utile} / \text{largeur initiale}$$

$$\text{Ainsi, } C = C_0 \times k \times \text{largeur initiale} = C_0 \times \text{largeur utile}$$

Concernant l'état de dégradation d'une route, il est le résultat des répétitions de charges et des facteurs environnementaux changeants qui agissent sur la chaussée au fil du temps comme en témoignent les différents types de dégradations. Ces dégradations ont un impact sur la qualité du transport et influencent les comportements de conduite et la rentabilité du transport notamment :

- Les changements de vitesse, les manœuvres, le choix de l'itinéraire (**Hashim H. et al., 2018**) : la sévérité de la dégradation et suivant le type de véhicules affecte la vitesse à laquelle un véhicule peut et veut circuler. Dans le cas des véhicules lourds qui sont les plus sensibles (véhicules de transport de matériaux de construction dans notre cas), le conducteur arbore la section de route dégradée avec prudence tout en diminuant la vitesse moyenne pour assurer la sécurité des marchandises transportées et minimiser les dommages sur le véhicule conforté par une étude menée par **Jihanny J. et al., en 2022** ;
- Les coûts et les temps de déplacement (**Khurram K. et al., 2023**) qui se traduisent par une l'augmentation du temps de trajet.

Dans une étude conduite par l'American Society for Testing and Materials (ASTM) en 2011, l'indice PCI a été proposé pour l'évaluation des chaussées. Il utilise une échelle d'évaluation où 100 indique un état idéal de la chaussée et 0 un état défectueux, comme illustré à la figure 2.3. L'indice PCI est depuis devenu un indicateur numérique reconnu et largement accepté de l'état des chaussées. La figure ci-après présente l'échelle d'évaluation.


| PCI | | RATING |
|-----|--|-----------|
| 100 | | Excellent |
| 85 | | Very Good |
| 70 | | Good |
| 55 | | Fair |
| 40 | | Poor |
| 25 | | Very Poor |
| 10 | | Failed |
| 0 | | |

Figure **Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..**1. L'indice d'état de la chaussée (PCI) et l'échelle d'évaluation avec les couleurs correspondantes (ASTM, 2011)

Une diminution du PCI entraîne une diminution de la vitesse **Jihanny J. et al., en 2022.**

Cet indice d'état de la chaussée (PCI) sera déterminé dans le cas de notre étude par inspection visuelle. Les données recueillies comprendront les dimensions et la gravité de la dégradation de la route. Celles-ci permettront de définir au moyen du PCI l'état de dégradation de la route conformément à la classification des routes suivant leur état au Cameroun (**MINTP, 2020**) que l'on notera $E \in \{\textit{bon état}, \textit{moyen état}, \textit{mauvais état}\}$.

Tableau **Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..**1. Présentation des catégories d'état de surface des routes (Fandjio, 2020)

| Type de route | Piste naturelle | Route en terre | Route revêtue |
|---------------------|---|--|---|
| Bon état |  Route secondaire de borne 12 (Odza) |  Route Oyak (Odza) |  Route de Nkolda – Nsimalen |
| Moyen état |  Route à Bikok |  Route Nkolmekoun |  Route secondaire à Ekié |
| Mauvais état |  Route Etenga sur la route de barrière |  Route secondaire à Nsimeyon terre rouge |  Route secondaire à Nkolbisson |

ii. L'état du trafic

Le trafic sur une route représente l'état de la circulation visible pendant une période donnée. C'est le facteur le plus courant et le plus significatif influençant le trajet d'un véhicule surtout en zone urbanisée. Il varie suivant les périodes de l'année (période de classe, période de vacances), les jours de la semaine (jours ouvrables, jours fériés) et les heures de la journée (heures de pointe, heures creuses). Plus le trafic s'intensifie, plus on observe une augmentation significative du temps de transport, se traduisant par une diminution de la fiabilité des livraisons.

Plusieurs théories ont été bâties pour modéliser l'écoulement de la circulation routière en empruntant des outils à différentes disciplines (la physique, les mathématiques appliquées, et

récemment l'informatique et l'automatique) et ont été adaptés pour reproduire les caractéristiques du trafic routier. Ces travaux scientifiques ont conduit à définir des paramètres caractéristiques, des variables descriptives et des équations mathématiques reliant ces différentes variables et paramètres, établissant ainsi des modèles de trafic qui permettent de traduire le comportement de la circulation aux différents niveaux de détails sur une section de route considérée. Ces modèles de trafic sont principalement classés en deux catégories : les modèles macroscopiques et les modèles microscopiques.

Les modèles macroscopiques permettent de décrire le comportement dynamique global de la circulation en considérant la circulation comme un phénomène continu par analogie avec la mécanique des fluides. Les variables mises en jeu permettant de décrire l'état du flux du trafic sont les suivantes (Ré-Mi Hage, 2012) :

- **Le débit du trafic** : il représente la quantité moyenne du flux q mesuré en nombre de véhicules N qui passent au point x de la section de route considérée, entre deux instants de temps t_1 et t_2 . Il permet de décrire la distribution des véhicules dans le temps, on peut le définir par sens de circulation : $q(x, t_1, t_2) = \frac{N}{t_2 - t_1}$
- **La densité moyenne** : encore appelée concentration spatiale, la densité moyenne ρ est définie par le nombre de véhicules N qui se trouvent à l'instant t dans la section délimitée par les points x_1 et x_2 . Elle décrit la distribution des véhicules dans l'espace, on peut également la définir par sens de circulation : $\rho(t, x_1, x_2) = \frac{N}{x_2 - x_1}$
- **La vitesse du flot** qui représente la vitesse équivalente V à laquelle un ensemble de véhicules traversent une section de route. De façon générale, on la définit en un point x et à un temps t par le rapport entre le débit instantané et la densité spatiale instantanée :

$$V(x, t) = \frac{q(x, t)}{\rho(x, t)} : \text{équation de la vitesse de flot}$$

- **L'équation de conservation** : le principe de conservation des véhicules intervient entre deux points x_A et x_B lorsqu'il n'y a ni de fuite ni de source de flux entre eux. Il dit que l'évolution du nombre de véhicules entre deux instants t_1 et t_2 est égale à la différence entre le flux entrant en x_A et le flux sortant en x_B .

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 : \text{équation de conservation du nombre de véhicule}$$

- **Le diagramme fondamental** : il représente les différentes relations qu'entretiennent les variables macroscopiques que sont le débit, la densité et vitesse. L'équation de la vitesse à l'état d'équilibre proposée par Greenshield à partir de données expérimentales.

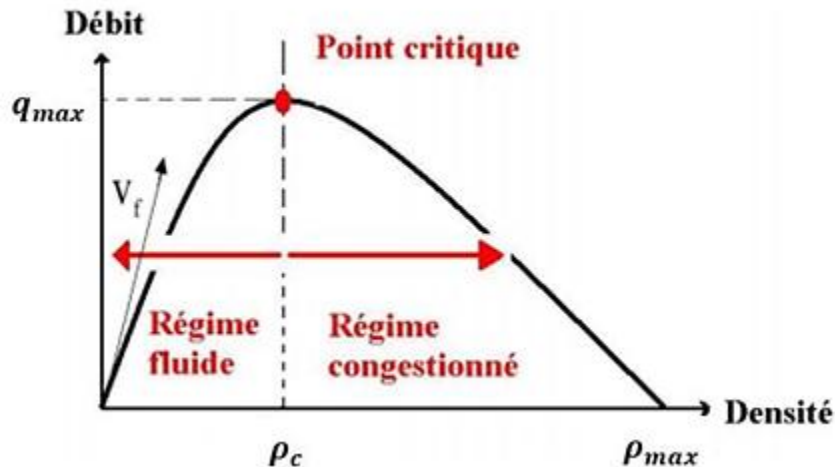


Figure **Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..**2. Diagramme fondamental (Ré-Mi Hage, 2012)

En première approximation, ce diagramme simule bien la réalité de la circulation routière. En effet lorsque la concentration des véhicules ρ est faible, ces derniers roulent à leur vitesse maximale autorisée (fixée par la réglementation) qui correspond à la vitesse libre du flux, notée V_f . Plus cette concentration dans la zone donnée de la route augmente, plus le débit de circulation q augmente. Cette augmentation se poursuivra jusqu'à atteindre le débit maximal q_{max} désignant la capacité de la section étudiée. Ce point est appelé point critique (ρ_c), et marque le début de la saturation de la section de route étudiée : c'est la congestion. Quand la concentration augmente, cette saturation se traduit par une diminution du débit et, par conséquent, de la vitesse. La densité maximale est obtenue dans le cas où tous les véhicules sont immobiles, ce qui désigne le nombre maximal de véhicules en arrêt complet qu'une route peut contenir.

Quant aux modèles microscopiques, ils décrivent le comportement individuel des véhicules en fonction des conditions de trafic rencontrées. Les variables sont donc exprimées pour chaque véhicule et sont étroitement liées à sa dynamique. Sa principale variable est la vitesse individuelle.

Au niveau microscopique, la vitesse moyenne v_m d'un véhicule est définie sur une durée T par :

$$v_m = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v(t) dt, \text{ où } v_i \text{ désigne la vitesse instantanée du véhicule } i.$$

La mesure de la vitesse instantanée d'un véhicule individuel nécessite des observations sur un intervalle d'espace $[x_1, x_2]$ et un intervalle de temps $[t_1, t_2]$. Cette vitesse est définie par :

$$v = \frac{dx}{dt} = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$$

L'étude du trafic permettra de fournir les meilleures fenêtres de livraison selon le scénario dans lequel on se trouve : heure du jour de la semaine de la période de l'année en zone urbaine (où les déplacements domicile-travail et domicile-école sont forts représentés) comme en rase campagne. Plus il y'a de véhicules sur la route, plus la vitesse moyenne diminue en passant d'une vitesse de flux libre à une vitesse de congestion, où la route devient saturée à l'atteinte d'un certain seuil de volume de véhicules, la circulation est quasi à l'arrêt et la vitesse tend vers 0.

Ainsi, le trafic peut être représenté par l'ensemble $S_{Traffic}$ défini par :

$$S_{Traffic} = \{Fluide; Dense; Embouteillé\}$$

iii. Les conditions météorologiques

Les conditions météorologiques sont liées au climat qu'il fait dans une zone géographique donnée à un moment donné. Elles sont généralement observables périodiquement au cours d'une année. Dans les pays de l'équateur comme c'est le cas du Cameroun, le climat tropical y règne avec deux principales saisons : la saison sèche et la saison de pluie. Parmi ces deux phénomènes, la pluie est celui qui a un impact significatif sur le trajet d'un véhicule sur une route, et ses effets multiples et parfois amplificateur se combinent pour réduire la vitesse. La modification de la vitesse comme mesure de sécurité est le résultat de la réduction de la praticabilité de la route suite à la diminution

de l'adhérence (coefficient de friction) entre les pneus et la surface de la route lors de la conduite, de la visibilité traduit par une difficulté de perception (diminution de la luminosité ambiante, brouillard...) comme le confortent les travaux de Sonu M. et al en 2021. Par ailleurs, ces conditions météorologiques amplifient l'impact des dégradations existantes. Par exemple, les nids-de-poule remplis d'eau deviennent invisibles et dangereux.

Dans cette situation, le véritable enjeu réside dans la prévision de la météo qui fait appel à d'importantes ressources matérielles et humaines. Les moyens existants ne sont pas suffisamment précis quant au lieu exact où il pleuvra. La prévision est pour toute une ville pourtant il ne pleut presque jamais sur une ville tout entière au même moment. Elle est donc une source d'incertitudes. On sait à priori que la probabilité d'avoir un jour de pluie ou qu'il pleuve est plus grande en saison de pluie qu'en saison sèche. Il est donc important de connaître comment varie les pluies en moyenne pour une région donnée pour une saison donnée afin d'évaluer son effet sur la vitesse en conditions d'adhérence et de visibilité dégradées. Néanmoins, la loi fixe des vitesses à arborer en cas de conditions météorologiques défavorables sur les différents axes routiers.

Au Cameroun, l'ONACC (Observatoire National sur les Changements Climatiques) mène des recherches et publie des bulletins sur les tendances climatiques, les événements extrêmes et leurs impacts. Leurs rapports sont une base de données qui fournissent selon chaque région du pays, les températures et précipitations moyennes pour chaque mois de l'année.

Dans le cadre de notre étude, nous définirons deux ensembles S_{pluie} et S_{sec} pour représenter les conditions météorologiques suivant les saisons. Les valeurs de ces derniers sont les différents mois appartenant à chaque saison.

$$S_{pluie} = \{Mars, Avril, Mai, Juin, Septembre, Octobre, Novembre\}$$

$$S_{sec} = \{Décembre, Janvier, Février, Juillet, Août\}$$

Ainsi, la probabilité qu'il pleuve durant le trajet dépend fortement de la saison. Cette dernière pourrait être déterminée grâce à un arbre de probabilité pour capturer l'effet cumulé des probabilités d'avoir un jour de pluie pour un mois donné pour une saison considérée.

La météo peut être représentée par un l'ensemble $S_{Météo}$ défini par

$$S_{Météo} = \{Sec; Pluie \}$$

iv. La performance de l'engin de transport

La performance d'un engin désigne l'efficacité avec laquelle il remplit sa fonction de transport ou simplement sa capacité à fonctionner efficacement et de manière fiable. C'est un attribut fondamental dans les opérations de transport. Cette performance est garantie par une maintenance régulière qui permet d'assurer la disponibilité de l'engin, de réduire les perturbations au cours du trajet notamment les interruptions dues à la réparation des pannes et les coûts inhérents (immobilisation de l'engin), d'optimiser le temps de transport et augmenter la productivité. Ces engins (véhicules lourds) selon la réglementation camerounaise (Arrêté n°011/A/MINT du 23 février 1998 portant réglementation de la visite technique des véhicules) doivent faire l'objet de visites techniques régulières (tous les 12 mois) pour vérifier l'état de l'engin (fonctionnement, détection des éventuelles défaillances...). Les éléments intéressants pour caractériser la performance d'un engin de transport sont la vitesse maximale et l'âge.

Concernant la vitesse, la loi (Décret n°79 341 du 3 septembre 1989 portant réglementation de la circulation routière) fixe les vitesses réglementaires autorisées selon qu'on soit en agglomération ou pas. Elles sont de 30 km/h pour les véhicules lourds en agglomération et dépend du poids maximum en charge (PMC) en dehors des agglomérations comme suit :

- $PMC < 3500$ kg : la vitesse égale la vitesse de référence de la route à l'exception des voitures de place et véhicules de transport ;
- $3500 < PMC < 12500$ kg : vitesse limitée à 60 km/h ;
- $PMC > 12500$ kg : vitesse limitée à 50 km/h ;
- Tout autre engin y compris les convois exceptionnels : vitesse limitée à 30 km/h ;

La masse des convois de matériaux étant généralement au-dessus de 15 tonnes, on peut donc considérer à priori une vitesse de référence valant 50 km/h.

Par ailleurs, les composants mécaniques sont soumis dès le début de leur vie au phénomène d'usure ou de vieillissement (Belloaouar A. et al., 2014). Leur cycle de vie présente deux phases : (i) la période de mortalité infantile décrite par une décroissance progressive du taux de défaillance

$\lambda(t)$ avec le temps dû à une amélioration des caractéristiques internes (caractéristiques de défauts) et des interfaces, par un rodage préalable des pièces ; (ii) la période de vieillissement qui comporte la majorité de la vie du dispositif caractérisée par une augmentation progressive du taux de défaillance représenté par la figure ci-après :

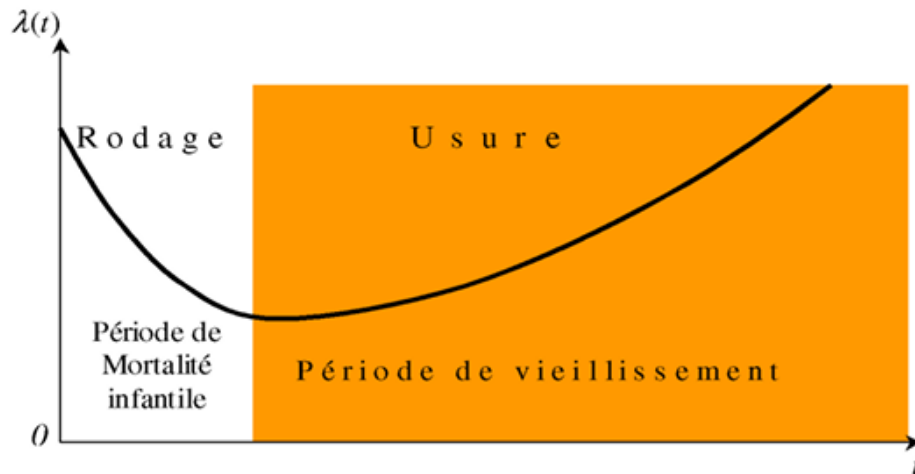


Figure **Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..**3. Courbe du taux de défaillance en mécanique (Belloaouar A. et al., 2014)

Par conséquent, la performance d'un engin diminue au fur et à mesure qu'il est utilisé et que le temps passe, du fait de ses pièces mécaniques qui sont soumises à des phénomènes de vieillissement multiples qui peuvent agir en combinaison : corrosion, usure, déformation, fatigue, et finalement perte de résilience ou fragilisation ; lesquelles dégradations conduisent à l'occurrence des pannes qui, selon le cas, peuvent être mineures ou majeures. Le calcul de la fiabilité de ses composants mécaniques peut se faire en utilisant des lois de probabilité dont le taux de défaillance est fonction du temps telles que la loi Log-normale, la loi Weibull... etc. Ainsi, plus un engin a de l'âge (compté en termes d'années d'utilisation), plus la probabilité de tomber en panne est élevée.

v. Le conducteur

Le conducteur n'est pas qu'un simple opérateur mais un acteur décisionnel dont le comportement est influencé par une multitude de facteurs personnels (besoins physiologiques) et contextuels (ravitaillement, péage, contraintes externes...). Pour les véhicules lourds, les contraintes liés aux spécificités de ces derniers (la charge, la taille, le poids et la mission) ajoutées

aux paramètres sus-évoqués influencent directement le comportement du conducteur. La perception du risque ou de l'effet de ces facteurs au cours du trajet est souvent lié à l'expérience (conscience des contraintes du véhicule, connaissance de l'itinéraire, conduite sous conditions défavorables), à la productivité (atteinte des objectifs de livraison) et à la sécurité. De plus, l'on peut admettre qu'il conduise difficilement au premier camionnage, ce qui est négligeable par rapport du nombre total d'approvisionnements généralement réalisés au cours du projet.

1.1.2.2. Modélisation du trajet sur un tronçon

On qualifiera de tronçon supposé homogène, toute section de route qui partage des caractéristiques similaires : le type de route (routes urbaines, autoroute, route en rase campagne), le type de revêtement, la géométrie et le même état de dégradation de la route ; supposé suffisamment uniforme pour être considérée comme unité d'analyse. Au cours du trajet, les caractéristiques du tronçon en termes de conditions de la route, de conditions météorologiques et de circulation font varier la vitesse de parcours : le tronçon se trouve dans un certain « état ». L'intérêt est de déterminer le temps de séjour dans chaque état susceptible d'être pris par le tronçon tout au long du parcours.

Considérons un arc de parcours (U_{pq}) ; $p, q = 1, 2, \dots$ localisé géographiquement et décomposer en n tronçons $(T_i)_{1 \leq i \leq n}$ eux également bien définis.

À chaque arc U_{pq} , on associe $T_{i; kls}^{pq}$ et t_{pq} où :

- p, q : représente l'indice de l'arc entre les sommets x_p et x_q ;
- $k \in K = \{\text{Route en terre (1); Route revêtue (2)}\}$: type de tronçon de tronçon considéré suivant la nature du revêtement ;
- $l \in L = \{\text{Zone urbaine (1); Rase campagne (2)}\}$: la localisation géographique du tronçon considéré ;
- $s \in \mathcal{S} = \{\text{Sèche (1); Pluie (2)}\}$: la saison considérée à laquelle on se trouve ;
- t_{pq} : le temps de trajet sur un arc de parcours.

NB : L'ensemble K est obtenu par la composition des différents critères cités à la section 3.4.2.1 et dont les plus pertinents ont été retenus. En effet, un itinéraire peut être constitué de plusieurs tronçons de type « *route urbaine* » séparés par des croisements, la présence d'un dalot ou d'une infrastructure hétérogène. La suite de la modélisation portera sur ces trois cas de figures suscités.

Chaque tronçon $T_{i;kl}^{pq}$ est un système caractérisé par :

- $L_{T_{i;kl}^{pq}}$ et $l_{T_{i;kl}^{pq}}$ ses caractéristiques propres que sont la longueur, la largeur ;
- E_i : son état de dégradation ;
- e_j : les différents états dans lesquels le trajet / le tronçon peut entrer : c'est l'ensemble des situations possibles dans lesquelles peut se trouver le tronçon. Ils sont déterminés par identification des facteurs susceptibles de l'impacter ;
- V_{e_j} : la vitesse de parcours dans ces derniers ;
- t_{t_i} : le temps de trajet total sur le tronçon.

i. Formulation des hypothèses

Pour mener à bien notre étude, il est indispensable de définir les considérations retenues pour notre modèle, entre autres :

- **H1** : 'Le conducteur ne prend pas de risques démesurés et privilégie la sécurité des marchandises'
- **H2** : 'Le véhicule fait l'objet de visites techniques tel que recommandé par la réglementation'

ii. Définition des états d'un tronçon

Les états sont définis suivant le niveau de congestion, le type de météo sachant l'état de dégradation. Ils sont liés à la praticabilité et l'impraticabilité d'une route. En effet, une route est dite « *Praticable* » lorsque le véhicule en bon état roule à la vitesse moyenne autorisée, sur une route en bon état dans un flux de trafic fluide sous de bonnes conditions climatiques. Par contre, elle est « *Difficilement praticable* » lorsque le véhicule en état de défaillance roule sur une route

dégradée pour un flux de trafic dense en présence d'intempéries. Néanmoins, toutes les conditions nécessaires à l'obtention de ces deux situations ne seront pas toujours réunies. Il est donc nécessaire de définir des états plus explicites qui traduisent de manière plus réaliste les différentes conditions ou situations dans lesquelles le tronçon peut se trouver.

A partir des paramètres décrits à la section 3.4.2.1 et suivant les hypothèses formulées, les états possibles pour un tronçon $T_{i;kl}^{pq}$ ayant un état de dégradation noté E_i , sont définis de la manière suivante.

Rappelons que les différents états individuels des paramètres 'trafic' et 'météo' sont :

$$S_{Trafic} = \{Fluide (F); Dense(D); Embouteillé(E) \}$$

$$S_{Météo} = \{Sec (S); Pluie (P) \}$$

Les états du tronçon $T_{i;kl}^{pq}$ sont la combinaison des états de trafic et de météo. Cet espace d'états est le produit cartésien de S_{Trafic} et $S_{Météo}$ défini ci-contre :

- **Etat 1** : Le tronçon se trouve dans un état de circulation fluide sous un temps sec noté (F, S) .
- **Etat 2** : Le tronçon se trouve dans un état de circulation dense sous un temps sec noté (D, S) .
- **Etat 3** : Le tronçon se trouve dans un état de circulation embouteillé sous un temps sec noté (E, S) .
- **Etat 4** : Le tronçon se trouve dans un état de circulation fluide sous une pluie noté (F, P) .
- **Etat 5** : Le tronçon se trouve dans un état de circulation dense sous une pluie noté (D, P) .
- **Etat 6** : Le tronçon se trouve dans un état de circulation embouteillé sous une pluie noté (E, P) .

NB : La numérotation « Etat 1 » ou « Etat 2 » ne signifie pas que ces états sont successifs. Ils permettent simplement d'effectuer un indexage des états pour la détermination des transitions entre ces derniers.

L'ensemble des états possibles est donc donné tel qu'il suit pour un tronçon $T_{i;klS}^{pq}$ pour tout $i = 1, 2, \dots, n$:

$$S_e = \{ (F, S, E_i); (D, S, E_i); (E, S, E_i); (F, P, E_i); (D, P, E_i); (E, P, E_i) \}$$

iii. Temps de séjour et temps de parcours dans un état

On considère que le présent dicte l'avenir immédiat c'est-à-dire que les conditions actuelles du trafic (densité, vitesse) et les conditions météorologiques du moment sont les facteurs prédominants qui influencent ce qui va se passer dans un prochain temps t . ; et que les mémoires sont intégrées dans l'état actuel.

Le temps de séjour τ_j dans l'état e_j est la durée pendant laquelle le système reste dans les conditions (trafic, météo) qui définissent l'état actuel du tronçon avant de transiter vers un autre état e_k . Ce temps est distribué exponentiellement de paramètre λ_j qui représente le taux de sortie dans l'état e_j (propriété des CMTC). Il représente l'inverse du temps moyen de séjour dans cet état et est indépendant du véhicule qui traverse le tronçon. Par exemple, le tronçon peut rester « Trafic dense, Temps pluvieux » pendant 30 minutes, peu importe si les véhicules le traversent ou non.

Le temps de parcours par état $t_{pij}(T_{i;klS}^{pq}, e_j)$ quant à lui représente le temps qu'il faut à un véhicule donné pour traverser complètement le tronçon $T_{i;klS}^{pq}$ si nous sommes au début du parcours ou la partie restante du tronçon sous la persistance de l'état e_j pendant tout ce parcours. Ce temps dépend de la vitesse associée à l'état e_j . Il est donné par :

$$t_{pij}(T_{i;klS}^{pq}, e_j) = \begin{cases} \frac{L_{T_{i;klS}^{pq}}}{V_{e_j}} & \text{si début du tronçon} \\ \frac{dr_{T_{i;klS}^{pq}}}{V_{e_j}} & \text{sinon} \end{cases}$$

(Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..1)

Où $L_{T_{i;klS}^{pq}}$ est la longueur du tronçon $T_{i;klS}^{pq}$ et V_{e_j} la vitesse moyenne attendue lorsque le tronçon

$T_{i;klS}^{pq}$ est dans l'état e_j

En effet, lorsqu'un véhicule traverse un tronçon :

- Le système (le tronçon) est dans un certain état e_j . Une vitesse de parcours V_{e_j} est associée à cet état.
- Le véhicule commence à parcourir le tronçon (ou la partie restante du tronçon) à cette vitesse V_{e_j}
- Simultanément, le "chronomètre" du temps de séjour de l'état e_j est en marche. On enregistre un temps de séjour τ_j selon la loi exponentielle de paramètre λ_j
- Deux situations peuvent se produire :
 - (i) Le véhicule termine sa portion de tronçon avant que l'état e_j ne change : dans ce cas, le temps de parcours pour cette portion est simplement ***Distance_parcourue***/ V_{e_j} . Le véhicule a terminé son trajet sur le tronçon, ou passe à un autre tronçon sous la persistance de l'état e_j qui continue d'exister sur le tronçon (potentiellement) après le départ du véhicule.
 - (ii) L'état e_j change vers un nouvel état e_h avant que le véhicule ne termine sa portion de tronçon : dans ce cas, le temps de parcours du véhicule dans l'état e_j est limité par le temps de séjour τ_j . La distance parcourue dans l'état e_j est $V_{e_j} \times \tau_j$. Ensuite, le véhicule se retrouve dans le nouvel état e_h , avec sa nouvelle vitesse V_{e_h} et le processus recommence avec un nouveau temps de séjour τ_h pour l'état e_h .

En somme, le temps de séjour décrit la persistance des conditions du tronçon tandis que le temps de parcours décrit la progression du véhicule à travers ces conditions : le véhicule se déplace à une certaine vitesse dictée par l'état actuel du tronçon, mais cet état est lui-même dynamique, avec une durée de vie aléatoire donnée par sa distribution de temps de séjour.

Par ailleurs, étant donné qu'un état résulte de la combinaison d'aléas, le temps de séjour dans un état dépendra de l'aléa qui fait transiter à un autre état du fait d'une variation ou d'un changement de sa valeur.

iv. Détermination de la matrice génératrice et des probabilités de transition

Dans une chaîne de Markov, lorsque le passage d'un état e_j à un état e_h ne dépend pas du pas de temps, les transitions sont fixes et on parle de chaîne de Markov homogène. Cependant, dans le trafic routier, les transitions entre les états de congestion (fluide, dense, embouteillé) varient considérablement au cours de la journée (heures de pointe, heures creuses) ou de la semaine (jours ouvrés, week-end) et l'occurrence d'apparition d'une pluie, de la saison dans laquelle on se trouve (saison de pluie, saison sèche). Dans ce cas, la chaîne de Markov est dite non homogène car les transitions dépendent du temps. Elles donnent lieu à des matrices $Q(t)$ et $P(t)$ complexes et dont l'estimation peut souvent faire recours à des méthodes statistiques d'inférence pour les processus stochastiques, ou à l'utilisation de covariables dépendantes du temps (i.e. les variables externes comme l'heure de la journée, les conditions météorologiques, les événements spéciaux).

Au regard de cette complexité, nous procéderons dans le cadre de notre étude à la discrétisation du temps par intervalles/périodes ; ce qui nous permettrait de supposer les matrices de transition constantes sur des intervalles/périodes de temps spécifiques, suivant la variabilité des paramètres dans le temps.

Une chaîne de Markov à temps continu non homogène comporte deux types de matrices : la matrice génératrice Q ou matrice des taux de transition et la matrice de transition P ou matrice des probabilités de transition.

- **La matrice génératrice Q**

Elle décrit les taux de transition entre les états de la chaîne et caractérise comment le système est susceptible de changer d'état sur un très petit intervalle de temps, sa tendance à changer d'état à un moment précis. En considérant Q constante, cela signifie que la propension du système à passer de l'état i à l'état j est la même, quel que soit le moment t où le système se trouve dans l'état i . Cette matrice est définie par :

$$Q = (q_{ij})$$

(Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..2)

Où q_{ij} représente le taux de transition de l'état i vers l'état j ; exprimée en unités de transitions ou en fréquence par unité de temps. Plus il est grand, plus la transition est probable sur un court laps de temps.

Ses propriétés :

- ♦ $q_{ij} \geq 0$ pour $i \neq j$;
- ♦ $q_{ii} = -\sum_{j \neq i} q_{ij} \leq 0$, autrement dit q_{ii} est négatif ou nul ;
- ♦ La somme des éléments de chaque ligne est nulle : $\sum_{j \in S} q_{ij} = 0$.

La valeur $|q_{ii}|$ est le paramètre de la loi exponentielle qui gouverne le temps de séjour dans l'état i , i.e. $\lambda_i = |q_{ii}|$. Un grand $|q_{ii}|$ signifie que le système ne reste pas longtemps dans l'état i .

- **La matrice de transition**

Elle décrit les probabilités d'état ou de transition après un certain temps fini t et représente la conséquence des dynamiques instantanées sur cette période. Cette matrice $P(t)$ est comme la position future ou probable ou la distribution de probabilité des positions futures après un certain temps. Elle est définie par :

$$P(t) = (P_{ij}(t))$$

(Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..3)

Où $P_{ij}(t)$ représente la probabilité que le système se trouve dans l'état j à l'instant $s + t$, sachant qu'il était dans l'état i à l'instant s .

Ses propriétés :

- ♦ $0 \leq P_{ij}(t) \leq 1$;
- ♦ La somme des éléments de chaque ligne est égale à 1 : $\sum_{j \in S} P_{ij}(t) = 1$.
- ♦ $P(0) = I$ (Matrice identité), car en un temps nul, le système reste dans son état actuel.

- ♦ Elle satisfait les équations de Chapman-Kolmogorov : $P(t + s) = P(t)P(s)$, dont la solution formelle est $P(t) = e^{Qt}$, où e^{Qt} est l'exponentielle de matrice

La matrice génératrice Q est le générateur de la matrice de transition $P(t)$. Pour une chaîne de Markov à temps continu homogène elle peut être approximée par :

$$P(t) = e^{Qt} = \sum_n \frac{(Qt)^n}{n!} = I + Qt + \frac{(Qt)^2}{2!} + \dots$$

(Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..4)

Par ailleurs, dans une chaîne de Markov, la distribution de probabilité des états est donnée par un vecteur ligne de probabilités noté $\pi(t) = (\pi_1(t), \dots, \pi_n(t))$ où $\pi_i(t)$ représente la probabilité que le tronçon soit dans l'état i à l'instant t . Le nombre de colonnes de $\pi(t)$ est le cardinal de l'espace des états. Ainsi :

$$\pi(s + t) = \pi(s)P(t)$$

(Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..5)

Ainsi, la vitesse dans chaque état e_j est donné par :

$$V_{e_j} = \sum_{i=1}^n \pi_i \times V_{e_i}$$

(Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..6)

Dans le cadre de notre étude, soit l'espace d'états S tel que :

$$S = \{ (F, S, E_i); (D, S, E_i); (E, S, E_i); (F, P, E_i); (D, P, E_i); (E, P, E_i) \}$$

Ou encore

$$S = \{ (F, S); (D, S); (E, S); (F, P); (D, P); (E, P) \}$$

Car l'état de dégradation E_i n'intervient pas dans la dynamique de changement d'état mais a un impact sur la vitesse nominale du tronçon T_i .

La matrice génératrice Q ordonnée par les états de S est une matrice d'ordre 6x6 donnée par :

$$Q = \begin{pmatrix} q_{FS,FS} & q_{FS,DS} & q_{FS,ES} & q_{FS,FP} & q_{FS,DP} & q_{FS,EP} \\ q_{DS,FS} & q_{DS,DS} & q_{DS,ES} & q_{DS,FP} & q_{DS,DP} & q_{DS,EP} \\ q_{ES,FS} & q_{ES,DS} & q_{ES,ES} & q_{ES,FP} & q_{ES,DP} & q_{ES,EP} \\ q_{FP,FS} & q_{FP,DS} & q_{FP,ES} & q_{FP,FP} & q_{FP,DP} & q_{FP,EP} \\ q_{DP,FS} & q_{DP,DS} & q_{DP,ES} & q_{DP,FP} & q_{DP,DP} & q_{DP,EP} \\ q_{EP,FS} & q_{EP,DS} & q_{EP,ES} & q_{EP,FP} & q_{EP,DP} & q_{EP,EP} \end{pmatrix}$$

(Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..7)

De même, on définit :

- Pour la météo, les périodes « *saison sèche* » et « *saison de pluie* »
- Pour le trafic, les épisodes de temps « *heure de pointe* » et « *heure creuse* » regroupant respectivement les intervalles de temps suivants : $[6h - 9h]$, $[16h - 21h]$ et $]16h - 21h[,]21h - 6h[$

La combinaison de ces épisodes de temps (météo, trafic) permet de séquencer dans le temps les matrices de la manière suivante :

- *Sèche* $\left| \begin{array}{l} \text{heure de pointe} \\ \text{heure creuse} \end{array} \right.$
- *Pluie* $\left| \begin{array}{l} \text{heure de pointe} \\ \text{heure creuse} \end{array} \right.$

Par ailleurs, en observant la matrice Q , on constate :

- **Des taux de trafic sous météo constante** : par exemple $q_{FS,DS} = q_{FD,Sec}$, $q_{FS,ES} = q_{FE,Sec}$ ou encore $q_{FP,DP} = q_{FD,Pluie}$, $q_{FP,EP} = q_{FE,Pluie}$. Ainsi, nous pouvons considérer les matrices Q_{Sec} et Q_{Pluie} pour les transitions entre états de trafic au sein des blocs “*Sec*” et “*Pluvieux*” indépendamment de la saison à laquelle on se trouve.

- **Des taux météo sous trafic constant** : par exemple $q_{FS,FP}$, $q_{DS,DP}$ ou encore $q_{FP,FS}$, $q_{EP,ES}$ qui dépendent respectivement du taux de passage de ‘*Sec à Pluvieux*’ et de ‘*Pluvieux à Sec*’. Or, le passage de ‘*Pluie à Sec*’ est rattaché à la durée moyenne de la pluie tandis que celui de ‘*Sec à Pluie*’ est rattaché à la probabilité qu’une pluie survienne, laquelle dépend de la saison.

La généralisation suivant les paramètres l pour la géolocalisation et s pour la saison considérée définis précédemment et la discrétisation effectuée, les matrices Q et P sont telles que :

- $Q^{ls} = (q_{ij}^{ls})$
- $P^{ls}(t) = (p_{ij}^{ls}) = e^{(q_{ij}^{ls}) \times t}$

(Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..8)

Ce qui conduit à définir les matrices génératrices Q pour chaque combinaison de conditions :

$$l \in L = \{Zone\ urbaine\ (1); Rase\ campagne(2)\}$$

$$s \in \mathcal{S} = \{S\grave{e}che\ (1); Pluie(2)\}$$

$$\bullet \quad Q^{11} = \begin{pmatrix} & & & \lambda_{SP}^{11} & q_{FS,DP}^{11} & q_{FS,EP}^{11} \\ & Q_{Sec}^{11} & & q_{DS,FP}^{11} & \lambda_{SP}^{11} & q_{DS,EP}^{11} \\ & & & q_{ES,FP}^{11} & q_{ES,DP}^{11} & \lambda_{SP}^{11} \\ \lambda_{PS}^{11} & q_{FP,DS}^{11} & q_{FP,ES}^{11} & & & \\ q_{DP,FS}^{11} & \lambda_{PS}^{11} & q_{DP,ES}^{11} & & Q_{Pluie}^{11} & \\ q_{EP,FS}^{11} & q_{EP,DS}^{11} & \lambda_{PS}^{11} & & & \end{pmatrix}$$

$$\bullet \quad Q^{12} = \begin{pmatrix} & & & \lambda_{SP}^{12} & q_{FS,DP}^{12} & q_{FS,EP}^{12} \\ & Q_{Sec}^{12} & & q_{DS,FP}^{12} & \lambda_{SP}^{12} & q_{DS,EP}^{12} \\ & & & q_{ES,FP}^{12} & q_{ES,DP}^{12} & \lambda_{SP}^{12} \\ \lambda_{PS}^{12} & q_{FP,DS}^{12} & q_{FP,ES}^{12} & & & \\ q_{DP,FS}^{12} & \lambda_{PS}^{12} & q_{DP,ES}^{12} & & Q_{Pluie}^{12} & \\ q_{EP,FS}^{12} & q_{EP,DS}^{12} & \lambda_{PS}^{12} & & & \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
\bullet \quad Q^{21} &= \begin{pmatrix} & Q_{Sec}^{21} & & \lambda_{SP}^{21} & q_{FS,DP}^{21} & q_{FS,EP}^{21} \\ & & & q_{DS,FP}^{21} & \lambda_{SP}^{21} & q_{DS,EP}^{21} \\ & & & q_{ES,FP}^{21} & q_{ES,DP}^{21} & \lambda_{SP}^{21} \\ \lambda_{PS}^{21} & q_{FP,DS}^{21} & q_{FP,ES}^{21} & & & \\ q_{DP,FS}^{21} & \lambda_{PS}^{21} & q_{DP,ES}^{21} & & Q_{Pluie}^{21} & \\ q_{EP,FS}^{21} & q_{EP,DS}^{21} & \lambda_{PS}^{21} & & & \end{pmatrix} \\
\bullet \quad Q^{22} &= \begin{pmatrix} & Q_{Sec}^{22} & & \lambda_{SP}^{22} & q_{FS,DP}^{22} & q_{FS,EP}^{22} \\ & & & q_{DS,FP}^{22} & \lambda_{SP}^{22} & q_{DS,EP}^{22} \\ & & & q_{ES,FP}^{22} & q_{ES,DP}^{22} & \lambda_{SP}^{22} \\ \lambda_{PS}^{22} & q_{FP,DS}^{22} & q_{FP,ES}^{22} & & & \\ q_{DP,FS}^{22} & \lambda_{PS}^{22} & q_{DP,ES}^{22} & & Q_{Pluie}^{22} & \\ q_{EP,FS}^{22} & q_{EP,DS}^{22} & \lambda_{PS}^{22} & & & \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

Où λ_{SP}^{ls} et λ_{PS}^{ls} les taux de passage de Sec à Pluvieux et de Pluvieux à Sec respectivement

En conséquence, la matrice $P(t)$ est donnée par :

$$\begin{cases} P^{11}(t) = e^{Q^{11} \cdot t} \\ P^{12}(t) = e^{Q^{12} \cdot t} \end{cases} \quad \begin{cases} P^{21}(t) = e^{Q^{21} \cdot t} \\ P^{22}(t) = e^{Q^{22} \cdot t} \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{(Erreur ! Il} \\ \text{n'y a pas de} \\ \text{texte} \\ \text{répondant à} \\ \text{ce style dans} \\ \text{ce} \\ \text{document..9)} \end{matrix}$$

v. Détermination du temps de trajet sur un tronçon

Deux approches peuvent être explorées pour le calcul du temps de trajet sur un tronçon.

Méthode 1 : Approche par simulation

Dans notre chaîne de Markov, deux sortes de temps ont été élucidées : le temps de séjour et le temps de parcours dans l'état. En suivant la trajectoire du véhicule de transport de bout en bout au travers de ses différents états, il est possible, dans un processus de simulation itératif, d'apprécier l'interaction entre ces deux grandeurs.

Pour chaque pas de simulation, le véhicule est dans une certaine position sur le tronçon, et le tronçon est dans un certain état.

Initialisation

$d = 0$ (Le véhicule commence au début du tronçon) ;

$t_t = 0$ (Le temps de transport sur le tronçon) ;

$e = S_{actuel}$ (L'état initial du tronçon) ;

$\lambda_e = \lambda_{S_{actuel}}$ (Taux de sortie de l'état actuel)

$V_e = V_{S_{actuel}}$ (Vitesse associée à l'état actuel) ;

L La longueur du tronçon, $d_r = 0$ distance restante

Traitement

$$\tau \leftarrow 1/\lambda_{S_{actuel}} ; \quad t_p \leftarrow L/V_{S_{actuel}}$$

Si $\tau < t_p$, // L'état du tronçon a changé avant que le véhicule n'atteigne la fin du tronçon : Le tronçon passe à un nouvel état. On utilise la matrice de transition pour déterminer le prochain état et la simulation continue.

$$t_t = \tau ; \quad d = \tau \times V_{S_{actuel}} ; \quad d_r = L - d$$

Sinon

//Le véhicule a atteint la fin du tronçon avant que l'état du tronçon ne change. La simulation est terminée. Le temps de parcours total du tronçon est le résultat pour cette simulation.

$$t_t = t_p$$

Au regard de la simulation, on constate que le temps réellement passé sur un tronçon dans un état e_j est ***min*** (τ_j, t_{p_j}).

Le temps de trajet total du tronçon est la somme des temps obtenus pour chaque état dans lequel le tronçon est passé. Soit un tronçon T_i et $r \leq 6$, le nombre d'états observés pour ce dernier, ce temps est donné par :

$$t_{t_i} = \sum_{j=1}^r \min(\tau_j, t_{p_j})$$

(Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans

ce
document..10)

Ainsi, pour chaque arc de parcours, le temps de trajet est donné par la somme des temps de trajet des tronçons qui le composent. Soit un arc de parcours U_{pq} composé de tronçons $T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow \dots \rightarrow T_n$, le temps de trajet moyen attendu est simplement :

$$t_{pq} = \sum_{i=1}^n t_{t_i}$$

(Erreur ! Il
n'y a pas de
texte
répondant à
ce style dans
ce
document..11)

Méthode 2 : Approche analytique

Cependant, cela n'est possible qu'en suivant le tronçon en temps réel ; ce qui n'est pas forcément le cas dans une perspective de prédiction. Néanmoins, malgré la nature non-homogène de notre chaîne, il est possible pour chaque combinaison de conditions qui permettrait de considérer des chaînes de Markov plus ou moins homogènes d'obtenir des probabilités stationnaires (ou d'état d'équilibre du système) qui représentent la proportion de temps que le tronçon passe dans chaque état à long terme. Elles sont obtenues en résolvant le système d'équations :

$$\begin{cases} \pi^{ls} \cdot Q^{ls} = 0 \\ \sum \pi^{ls_j} = 1 \end{cases}$$

(Erreur ! Il
n'y a pas de
texte
répondant à
ce style dans
ce
document..12)

Le résultat est un vecteur $\pi_{stationnaire}^{ls} = (\pi_{FS}^{ls}, \pi_{DS}^{ls}, \pi_{ES}^{ls}, \pi_{FP}^{ls}, \pi_{DP}^{ls}, \pi_{EP}^{ls})$, où chaque π_j^{ls} est la proportion de temps que le système passe dans l'état e_j à long terme.

Ainsi, le temps de trajet total moyen du tronçon est le rapport de la longueur du tronçon sur la vitesse moyenne pondérée empruntée sur celui-ci. Soit un tronçon $T_{i,ls}$ de longueur L_i et de vitesse $V_{moy,i}$, ce temps est donné par :

$$t_{moy,i} = \frac{L_i}{V_{moy,i}}$$

(Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..13)

Avec :

$$V_{moy,i} = \sum_{j=1}^6 \pi_j^{ls} \cdot V_{e_j}$$

(Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..14)

V_{e_j} : vitesse associée à l'état

Ainsi, pour chaque arc de parcours U_{pq} composé de tronçons $T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow \dots \rightarrow T_n$, le temps de trajet moyen est donné par :

$$t_{pq} = \sum_{i=1}^n t_{moy,i}$$

(Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..15)

vi. Temps d'attente

Le temps d'attente ou d'arrêt est une donnée qui suit les modalités pratiques en termes de contrôles routiers, de péages et de régulation de la circulation par des feux de signalisation. Ces temps perdus sont à peu près constants à tout voyage et peuvent être négligés étant de l'ordre de quelques minutes.

1.1.2.3. Méthodes de collecte des données utilisées

Pour enrichir notre modèle et le rendre plus réaliste, trois méthodes complémentaires ont été sollicitées ; chacune contribuant à une meilleure compréhension de la dynamique de trafic et l'influence des facteurs météo et état de dégradation sur le trajet. L'ensemble délivre des jeux de données qui convergent sur la base des hypothèses réalistes à l'obtention des valeurs nécessaires pour l'opérationnalisation de notre modèle. On a entre autres :

- **Revue documentaire de la littérature académique en ingénierie des transports et en modélisation stochastique** : elle a consisté en une analyse du principe de la Théorie des files d'attente (Queueing Theory), des modèles de trafic macroscopique (Cell Transmission Model, etc.), des études empiriques sur l'impact des aléas pour fournir le contexte justifiant la dynamique de transition ;
- **Enquête de terrain** : qui permettra de collecter des données résultant des pratiques réelles en supplément à celles fournies par la littérature, auprès d'un échantillon d'acteurs du secteur du BTP et des transports au Cameroun. Des questionnaires seront constitués en l'absence de données de capteurs routiers, de GPS, de big data ou données historiques sur le trafic routier et ses dynamiques de transition. Par ailleurs, ils permettront de récolter l'avis des experts pour la pondération des critères d'évaluation de la fiabilité des fournisseurs

Cible 1 : Entreprises de construction, Maitrise d'œuvre

Cible 2 : Transporteurs, fournisseurs

Modèle de questionnaire

Le modèle est présenté en (**Annexe 1**).

1.2. AGREGATION POUR DETERMINATION DE L'ITINERAIRE OPTIMAL

L'agrégation est l'étape finale de l'estimation du temps de transport des matériaux dans un circuit d'approvisionnement. C'est le pont entre la modélisation détaillée de chaque segment de route et la fourniture d'une estimation globale et pertinente du temps de transport pour l'utilisateur final. Connaissant les temps de transport sur chaque itinéraire, $G = (X, U)$ devient un graphe valué à valeurs positives car le temps est une valeur toujours positive, dont il sera question de rechercher

le chemin optimal minimisant ce dernier. En recherche opérationnelle, plusieurs algorithmes sont proposés pour le problème de recherche du chemin le plus court selon sa nature. Seulement, dans un environnement où les conditions de circulation changent dynamiquement tel un réseau routier, les pondérations (ou délais) associées aux arcs évoluent également dynamiquement au fil du temps suivant le point de départ. Il ne s'agit donc plus d'une simple recherche du chemin le plus court faisant appel aux algorithmes classiques, mais plutôt d'un problème dépendant du temps.

Ainsi, nous utiliserons un Time Dependant Graph (TDG) c'est-à-dire un graphe dépendant du temps G_T tel l'algorithme Xtended Dijkstra proposé par (Bolin D., et al. 2008), qui est un graphe qui possède une fonction de retard d'arrêt, $w_{ij}(t)$, associée à chaque arc (v_i, v_j) , stockée dans une base de données. Cette fonction de retard d'arrêt $w_{ij}(t)$ spécifie le temps nécessaire pour se déplacer du nœud v_i au nœud v_j , si le trajet part de v_i à l'instant t . Il sera adapté suivant notre contexte.

Principe

Étant donné une source v_s et une destination v_e , sur le sur le graphe dépendant du temps, et une fenêtre temporelle T pour considérer le départ de v_s , une requête utilisateur consiste à déterminer le chemin de temps de trajet minimal et la meilleure heure de départ sélectionnée dans un intervalle de temps T .

| Notation | Meaning |
|------------------------------|---|
| $G_T(V, E, W)$ | time-dependent graph (or G_T for short) |
| n, m | number of nodes $ V $, number of edges $ E $ |
| $w_{i,j}(t)$ | edge-delay function for $(v_i, v_j) \in E$ |
| v_s, v_e, T | source, destination, starting-time interval |
| p^* | optimal path from v_s to v_e |
| t^* | optimal starting time |
| $\varpi^*(v_i)$ | optimal waiting time at node v_i |
| $g_i(t)$ | v_s - v_i earliest arrival-time function |
| $g_p(t)$ | arrival-time function (along path p) |
| $\alpha(T)$ or $\alpha(T)$ | time/space required to maintain a function or to manipulate a function operation over time interval T |

Algorithm 3 *timeRefinement* ($G_T(V, E, W), v_s, v_e, T$)

Input: a time-dependent graph G_T , a query $\text{LTT}(v_s, v_e, T)$ - source v_s , destination v_e , and starting-time interval $T = [t_s, t_e]$;

Output: $\{g_i(t) | v_i \in V\}$ - all earliest arrival-time functions.

```
1:  $g_s(t) \leftarrow t$  for  $t \in T$ ;  $\tau_s \leftarrow t_s$ ;
2: for each  $v_i \neq v_s$  do
3:    $g_i(t) \leftarrow \infty$  for  $t \in T$ ;  $\tau_i \leftarrow t_s$ ;
4: Let  $Q$  be a priority queue initially containing pairs,  $(\tau_i, g_i(t))$ ,
   for all nodes  $v_i \in V$ , ordered by  $g_i(\tau_i)$  in ascending order;
5: while  $|Q| \geq 2$  do
6:    $(\tau_i, g_i(t)) \leftarrow \text{dequeue}(Q)$ ;
7:    $(\tau_k, g_k(t)) \leftarrow \text{head}(Q)$ ;
8:    $\Delta \leftarrow \min\{w_{f,i}(g_k(\tau_k)) \mid (v_f, v_i) \in E\}$ ;
9:    $\tau'_i \leftarrow \max\{t \mid g_i(t) \leq g_k(\tau_k) + \Delta\}$ ;
10:  for each  $(v_i, v_j) \in E$  do
11:     $g'_j(t) \leftarrow g_i(t) + w_{i,j}(g_i(t))$  for  $t \in [\tau_i, \tau'_i]$ ;
12:     $g_j(t) \leftarrow \min\{g_j(t), g'_j(t)\}$  for  $t \in [\tau_i, \tau'_i]$ ;
13:     $\text{update}(Q, (\tau_j, g_j(t)))$ ;
14:   $\tau_i \leftarrow \tau'_i$ ;
15:  if  $\tau_i \geq t_e$  then
16:    if  $v_i = v_e$  then
17:      return  $\{g_i(t) | v_i \in V\}$ ;
18:    else
19:       $\text{enqueue}(Q, (\tau_i, g_i(t)))$ ;
20: return  $\{g_i(t) | v_i \in V\}$ .
```

L'exécution de l'algorithme de Xtended Dijkstra nous fournit la durée du plus court chemin du sommet *Fournisseur* origine de notre graphe au sommet *Chantier* et l'heure de départ.