



*Groupe Opérationnel 4*

**Plates-formes en centre-ville pour la Logistique  
Urbaine : étude sur la ville de Marseille**

**Projet PLUME**

*Janvier 2010-Septembre 2011*

**RAPPORT FINAL**

**Partenaires** : Ecole des Mines de Saint-Etienne, Jonction, SOGARIS, Cluster PACA Logistique

**Contact** : D. Feillet, Ecole des Mines de Saint-Etienne, feillet@emse.fr

*Réalisé dans le cadre de la CONVENTION DE SUBVENTION N° 09 MT CV 39, Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer en charge des Technologies vertes et des Négociations sur le climat.*

## Résumé du projet

La question centrale autour de laquelle s'est articulé le projet PLUME est le retour des investissements de circulation des marchandises dans les centres-villes. Le projet s'est ainsi intéressé à évaluer l'intérêt de la mise en œuvre de systèmes de distribution urbaine à partir de ZLU (Zones Logistiques Urbaines), dans le cadre d'activités de messagerie et messagerie express.

La principale contribution pratique du projet est le développement d'un outil d'aide à la décision pour la conception de schémas de distribution urbaine. En fonction d'un découpage de la ville en zones, d'un niveau de demande prévisionnel par zone, de catégories de véhicules à disposition, d'un ensemble de site potentiels (ou existants) pour accueillir l'activité logistique et de critères économiques, environnementaux et sociétaux, l'outil propose des réponses aux questions suivantes : quels sites sélectionner, comment les dimensionner, quelle flotte de véhicules y associer, comment répartir la distribution des différentes zones de demandes à partir de ces sites. Les modèles utilisés suivent les paradigmes de la programmation mathématique en nombres entiers.

Le terrain d'analyse alimentant l'outil pendant la durée du projet a été la ville de Marseille qui possède la particularité de disposer d'une ZLU en cœur de centre-ville avec la plate-forme d'Arenc, gérée par SOGARIS. Après étude des caractéristiques de la messagerie et de l'express à Marseille, des expérimentations ont permis de valider le comportement de l'outil.

L'outil est exploitable aussi bien pour des collectivités locales désireuses d'avoir une réflexion globale sur la distribution de marchandises sur leur territoire, que pour des messagers s'interrogeant sur leur stratégie de développement. Afin de faciliter la diffusion de l'outil, un travail important été réalisé dans le développement d'une interface utilisateur conviviale, utilisable sous différents systèmes et par un simple transfert de fichiers.

## Table des matières

1. Introduction.....	4
2. Synthèse sur la démarche et les réalisations .....	5
2.1 Etudes initiales.....	5
Document 1 - Référentiel messagerie.....	5
Document 2 - Planification stratégique pour la logistique urbaine verte : état de l'art .....	6
2.2 Modélisation.....	6
Document 3 – Conception d'un réseau de distribution en milieu urbain : formulation et hypothèses de modélisation .....	6
Document 4 – Modélisation mathématique .....	7
2.3 Outil d'aide à la décision .....	7
Document 5 – Outil d'aide à la décision.....	8
2.4 Cas d'étude.....	8
Document 6 - Etude sur la ville de Marseille : description des données .....	8
2.5 Résultats et analyses .....	8
Document 7 – Analyses .....	8
3. Conclusions et perspectives .....	9

## Documents joints

REFERENTIEL MESSAGERIE.....	10
PLANIFICATION STRATEGIQUE POUR LA LOGISTIQUE URBAINE VERTE : ETAT DE L'ART .....	22
CONCEPTION D'UN RESEAU DE DISTRIBUTION EN MILIEU URBAIN : FORMULATION ET HYPOTHESES DE MODELISATION .....	40
MODELISATION MATHEMATIQUE .....	54
OUTIL D'AIDE A LA DECISION .....	62
ETUDE SUR LA VILLE DE MARSEILLE : DESCRIPTION DES DONNEES.....	75
APPROCHE METHODOLOGIQUE POUR EXPLOITATION DU LOGICIEL PLUME.....	81

## 1. Introduction

Le fonctionnement d'une ville implique mécaniquement des échanges de marchandises et le volume de ces derniers est reconnu comme étant un bon indicateur de la dynamique des zones urbaines. Ce besoin de desserte s'appuie sur des plates-formes, installations physiques qui sont les véritables "pilotes" du système logistique urbain.

Ces équipements d'articulation des flux ont largement quitté les agglomérations pour s'installer dans des périphéries toujours plus éloignées. Les raisons sont multiples : urbanistiques (impossibilité réglementaire de s'installer), politiques (rejet d'outils jugés créateurs de nuisances), économiques (coût du foncier prohibitif). Pourtant il est évident qu'un positionnement éloigné du barycentre urbain induit un allongement des distances parcourues, une perte d'efficacité globale, un accroissement des GES et autres émissions de polluants. Aussi, nombre d'acteurs tant institutionnels que professionnels s'accordent à reconnaître l'utilité de démarches visant à repositionner les plates-formes au plus près du consommateur.

C'est ce postulat que nous avons étudié dans cette recherche en prenant une des cibles les plus emblématiques de la logistique urbaine : la messagerie. Cette activité étant particulièrement intéressante puisque d'une part les "clients" sont généralement situés en ville et d'autre part c'est sans doute le segment de la logistique urbaine qui produit les éléments perçus les plus négativement par la population (gênes fonctionnelles, nuisances environnementales).

En nous appuyant sur une analyse fonctionnelle et organisationnelle des systèmes de distribution par messagerie et messagerie express en centre-ville, le cœur du projet a consisté à développer un outil d'aide à la décision pour la conception de schémas de distribution en ville. Il s'agit ainsi de déterminer, dans une situation donnée (emplacements disponibles, contraintes environnementales et budgétaires, flux attendus, véhicules disponibles ou pouvant être utilisés...) le nombre souhaitable d'implantations de plateformes, leur positionnement optimal, et le système de distribution à mettre en place à partir de ces sites.

Le terrain d'analyse alimentant l'outil pendant la durée du projet a été la ville de Marseille qui possède la particularité de disposer d'une ZLU (Zone Logistique Urbaine) en cœur de centre-ville avec la plate-forme d'Arenc, gérée par SOGARIS.

Les documents réalisés au cours du projet sont les suivants :

1. Référentiel messagerie ;
2. Planification stratégique pour la logistique urbaine verte : état de l'art ;
3. Conception d'un réseau de distribution en milieu urbain : formulation et hypothèses de modélisation ;
4. Modélisation mathématique ;
5. Outil d'aide à la décision ;
6. Etude sur la ville de Marseille : description des données
7. Approche méthodologique pour exploitation du logiciel PLUME.

Chacun de ces documents présente une synthèse du travail réalisé selon l'un des axes du projet. Leur positionnement respectif est le suivant. Les documents 1 à 2 ont guidé la modélisation. Le document 3 recense les choix de modélisation effectués et discute des hypothèses sous-jacentes et des limites.

La traduction mathématique des modèles est présentée dans le document 4, qui sert de support à l'outil d'aide à la décision développé. Le document 5 fournit une aide à l'utilisation de l'outil. Ce document s'appuie sur les idées développées dans le document 3. Le document 6 présente un ensemble de données qui constitue un cas d'étude pour l'outil et sur lesquelles ont été réalisées les expérimentations. Le document 7 décrit la méthodologie proposée et l'illustre sur un exemple.

La suite du présent rapport est organisée de la manière suivante. Ci-après, des éléments généraux sur les motivations propres à chaque document, leur rôle dans le projet et leur positionnement respectif sont proposés. Une discussion sur les résultats, les limites et les perspectives du projet suit cette présentation. Le rapport se termine par les 7 documents, présentés de manière séquentielle.

En dehors de ce rapport et des 7 documents, une réalisation importante du projet est l'outil d'aide à la décision. Cet outil n'est pas proposé au téléchargement libre sur un site, mais peut être rendu disponible sur demande.

## **2. Synthèse sur la démarche et les réalisations**

### **2.1 Etudes initiales**

La première partie du projet a consisté en deux études : étude des caractéristiques de la messagerie et de la messagerie express à Marseille, étude de la littérature scientifique sur la conception de réseaux de distribution. Ces deux études étaient nécessaires pour poser les bases de la modélisation et des définitions fonctionnelles de l'outil d'aide à la décision à réaliser.

#### **Document 1 - Référentiel messagerie**

Le contour du projet ayant d'une part été délimité autour des activités de messagerie et messagerie express, d'autre part centré sur l'étude de cas de la ville de Marseille, il était essentiel de faire une photographie de la messagerie et de l'express à Marseille et d'en pointer les principales tendances et évolutions.

Deux buts parallèles étaient ainsi poursuivis :

- un objectif générique et global : faire ressortir l'organisation sous-jacente aux systèmes de messagerie et messagerie express, en supposant que le fonctionnement observé à Marseille est représentatif du fonctionnement classique en agglomération, de manière à aider à la définition des contraintes et critères à prendre en compte dans nos modèles ;
- un objectif plus local : faire ressortir des éléments quantitatifs sur lesquels appuyer la définition des données utilisées dans le cas d'étude de Marseille.

Ce référentiel a été réalisé sous forme d'enquêtes auprès des principaux messagers et expressistes desservant la ville de Marseille. Après avoir rappelé le champ de la distribution urbaine couvert par la messagerie et l'express, nous décrivons :

- les dimensions et positions des plateformes ;
- l'organisation retenue par les messagers pour la distribution ;
- les caractéristiques des tournées, incluant les véhicules utilisés ;
- les volumes transportés.

En complément, des éléments sont donnés sur la vision du présent et du futur par les messagers.

## **Document 2 - Planification stratégique pour la logistique urbaine verte : état de l'art**

Ce document poursuit également différents buts :

- décrire les infrastructures physiques sur lesquelles reposent ou peuvent reposer la logistique urbaine ;
- faire l'état de l'art des modèles et méthodes développés dans le cadre de la conception de réseau de distribution urbaine dans la littérature scientifique ;
- cerner les problématiques de conception de réseaux (hors distribution urbaine) pouvant servir de source d'inspiration dans la mise au point de nos modèles.

La première partie du document précise les contours de la logistique urbaine et revient sur les différentes catégories d'espaces logistiques urbains.

Devant le manque de travaux consacrés à la planification stratégique en logistique urbaine, l'essentiel de la deuxième partie du document est consacré à une présentation didactique des principaux modèles relatifs à la conception de réseau dans un cadre général (Facility Location Problems, Network Design Problems).

Une partie finale complète l'état de l'art en revenant sur les modèles prenant en compte les différents piliers du développement durable, et en particulier les critères environnementaux.

### **2.2 Modélisation**

Une fois ces deux études réalisées, l'étape suivante a été de poser de manière précise les contours du projet. Il a alors été possible de mettre au point l'outil d'aide à la décision et de définir les formats de données nécessaires à l'utilisation de l'outil. Tout ceci est traduit dans deux documents : un premier document ciblé sur les choix de modélisation et la synthèse des réflexions concernant cette modélisation, un deuxième document proposant une traduction mathématique de la modélisation proposée.

A noter qu'il a été très tôt fait dans le projet le choix de privilégier la simplicité lorsque cela était possible, ceci afin de favoriser l'usage futur de l'outil d'aide à la décision.

### **Document 3 - Conception d'un réseau de distribution en milieu urbain : formulation et hypothèses de modélisation**

Ce document répertorie les différentes contraintes et critères pris en compte dans les modèles développés. Il constitue en quelque sorte une mise en adéquation des objectifs du projet et d'une synthèse des informations relevées dans les deux études initiales. Son but est triple.

Dans un premier temps, il s'agit de préciser les objectifs poursuivis et notamment de déterminer quels services doit pouvoir rendre l'outil d'aide à la décision, et à qui il s'adresse. Deux catégories d'utilisateurs ont été identifiées : collectivités, messagers. Un troisième groupe, les aménageurs logistiques, est considéré comme ayant les mêmes attentes que les collectivités.

Dans un deuxième temps, il s'agit de répertorier les données nécessaires à l'utilisation des modèles, permettant ainsi de déterminer les informations à récupérer auprès des différents acteurs concernés par le système.

Enfin, il s'agit de définir le contenu même des modèles, posant ainsi les bases d'une modélisation mathématique que ne se réduit alors plus qu'à sa dimension purement technique.

En plus de livrer de manière brute, les choix effectués et les contraintes / critères retenus, le document insiste sur les principales hypothèses sous-jacentes à la modélisation et les principales limites de l'approche. Ainsi de nombreuses perspectives et pistes d'amélioration sont mises en avant. Faute de temps et de retour d'utilisateurs potentiels suffisamment tôt dans le projet (rappelons que la durée prévue pour le projet était 18 mois), ces pistes n'ont pu être traitées. Il est malgré tout intéressant de préciser que les nombreuses présentations réalisées dans le cadre du projet (auprès du ministère, du groupe TMV, dans des colloques...) ont largement alimenté nos réflexions.

#### **Document 4 - Modélisation mathématique**

Ce document plus technique présente la traduction mathématique des problématiques formulées précédemment. Un objectif important a été de répondre à l'aide d'un même modèle aux questionnements que peuvent se poser des collectivités locales ou un messenger.

Une problématique importante dans l'écriture de modèles mathématiques est la possibilité d'utiliser un solveur générique pour leur résolution, dans les temps exigés par l'utilisation. La contrainte de temps fixée ici a été de quelques secondes. Plus qu'un outil délivrant une solution optimale pour une situation donnée, le but de l'outil est en effet de permettre de comparer des scénarios, d'évaluer de évolutions, des tendances, des possibilités... Il était donc essentiel d'avoir un temps de réponse rapide.

Plusieurs modèles ont été envisagés afin de répondre au mieux à cette exigence. Le document est organisé comme suit :

- présentation de deux modèles dans un cas d'utilisation classique par un messenger ;
- présentation d'un modèle dans un cas d'utilisation classique par des collectivités ;
- présentation d'un modèle générique, intégrant les deux cas particuliers précédents et permettant de les mixer de manière à traiter des cas plus complexes.

### **2.3 Outil d'aide à la décision**

Le cœur de l'outil d'aide à la décision est un noyau d'optimisation basé sur la modélisation mathématique évoquée précédemment. Ce noyau a été intégré dans une interface utilisateur conviviale et graphique, permettant une utilisation aussi aisée que possible de l'outil.

Plusieurs points importants méritent d'être notés.

Comme indiqué dans la section précédente, il était impératif que le temps de réponse de l'outil soit de quelques secondes au plus. Pour garantir ce temps de réponse, nous avons décidé de procéder ainsi : limiter l'appel à l'algorithme d'optimisation à quelques secondes et retourner la meilleure solution trouvée. Pour donner à l'utilisateur une information sur la qualité de la solution retournée, l'écart théorique maximal par rapport à l'optimum mathématique est affiché.

Cette nécessité de réactivité est renforcée par un deuxième impératif. Pour faciliter la portabilité de l'outil, il n'était pas concevable d'utiliser un solveur commercial ou un solveur qui nécessiterait une installation complexe. Bien que n'étant pas le produit le plus efficace, nous avons, pour cette raison, décidé d'utiliser le solveur libre Glpk.

Une deuxième version de l'outil, utilisant le moteur d'optimisation IBM Ilog Cplex a été mise en place et testée. Les expérimentations ont démontré un comportement plus efficace. Malgré tout, l'écart en qualité des solutions reste très limité et justifie pleinement le choix de la simplicité.

Afin d'aider l'utilisateur au maniement de l'outil, un manuel d'utilisation a été rédigé. Il est important de comprendre que ce manuel adresse uniquement les points techniques relatifs à l'utilisation de l'outil. Tout ce qui concerne la manière de mener une étude est plutôt présenté dans les documents numéro 3 et 7.

### **Document 5 – Outil d'aide à la décision**

Ce document décrit les fonctionnalités de l'outil d'aide à la décision et explique comment l'utiliser. Une première partie détaille les modalités d'installation et explique le principal général du fonctionnement. Les différentes parties de l'interface utilisateurs sont ensuite décrites :

- fenêtre de lancement de l'application ;
- fenêtre solution ;
- menus.

### **2.4 Cas d'étude**

Afin d'évaluer l'outil dans un contexte réaliste, nous avons défini un jeu de données correspondant à la situation Marseillaise. Les informations obtenues à travers le référentiel et des contacts avec les collectivités locales (AGence d'urbanisme de l'Agglomération Marseillaise – AGAM) ont permis de converger vers certaines caractéristiques pour les données. Malgré tout, il n'a pas été possible, dans le temps du projet, d'aboutir à des jeux de données traduisant de manière précise la situation de la messagerie dans la ville de Marseille.

Les valeurs retenues pour les différentes données de l'étude sont recensées dans le document 6. Ce document constitue un exemple utile pour la reproduction d'études dans d'autres contextes.

### **Document 6 - Etude sur la ville de Marseille : description des données**

Ce document répertorie les données du cas d'étude. Les données sont détaillées en suivant le plan suivant :

- données associées aux secteurs ;
- données associées aux plateformes ;
- données associées aux véhicules ;
- données additionnelles associées aux distances et durées.

### **2.5 Méthodologie pour la conduite d'études**

Dans le but de faciliter l'utilisation de l'outil, nous avons enfin précisé la méthodologie à suivre pour mener une étude.

### **Document 7 – Approche méthodologique pour exploitation du logiciel PLUME**

Ce document décrit la méthodologie proposée, pour les deux cas d'utilisation envisagés (messagers, collectivités). Une illustration rapide sur le cas de Marseille est proposée.

### 3. Conclusions et perspectives

Le projet PLUME a abordé la problématique de la conception d'un réseau de distribution pour les activités de messagerie et messagerie express en milieu urbain. Le projet a permis de :

- faire un point complet sur le fonctionnement de la messagerie et de la messagerie express en ville, notamment dans le cas de la ville de Marseille ;
- faire un point complet sur les modèles existant dans la littérature pour répondre à ce type de questions ;
- proposer une méthodologie précise pour aborder ces questions, à destination des collectivités et des entreprises de messagerie ;
- développer un outil d'aide à la décision permettant, de manière aussi simple et conviviale que possible, de mener une étude dans un contexte réel ;
- illustrer l'application de cette méthodologie et l'utilisation de cet outil dans le cas de la ville de Marseille.

L'avancement du projet et l'outil développé ont été présentés à de nombreuses occasions auprès de publics divers. L'accueil des experts, des professionnels et des collectivités a toujours été très positif et de nombreuses personnes se sont montrées intéressées par son utilisation. L'accueil de la communauté scientifique est également très encourageant : plusieurs publications en conférences sont déjà effectives et la finalisation de l'écriture d'articles de revues scientifiques est en cours. Le projet a par ailleurs permis de recevoir et d'échanger avec le professeur Taniguchi (Université de Kyoto) et avec le professeur Crainic (CIRRELT, Montréal), deux experts reconnus internationalement en logistique urbaine.

Cela dit, une utilisation directe de l'outil par un messenger ou des collectivités reste encore difficile à envisager. Certaines limites de l'interface sont encore trop pénalisantes pour permettre une utilisation simple par des personnes externes au projet. Parmi celles-ci notons par exemple : la complexité à définir de manière adéquate certains types de données ou l'affichage des résultats expérimentaux.

Cela dit, nous restons confiants dans la valeur du modèle et dans la capacité de l'outil à répondre à des situations pratiques réelles. Nous allons continuer à essayer de convaincre des partenaires (collectivités ou messagers) à utiliser cet outil et à nous aider à remédier à ses défauts actuels.

Nous tenons enfin à remercier le groupe GO4 du PREDIT pour nous avoir soutenus financièrement et accompagnés tout au long de ce projet.

# REFERENTIEL MESSAGERIE

Ce document présente la méthodologie et les conclusions de l'enquête effectuée auprès des messagers de la ville de Marseille, à propos de l'organisation de la messagerie à Marseille.

## 1. Le cadre général.

### 1.1. La messagerie.

Traditionnellement définie par opposition au transport de lots, **la messagerie s'adresse aux envois de moins de 3 tonnes constitués de colis<sup>1</sup>.**

Pour réaliser l'acheminement des produits qui relèvent de cette définition, il est nécessaire de mettre en œuvre plusieurs opérations :

- la ramasse du colis chez le client (son enlèvement) ;
- le groupage sur une plate-forme dite de "passage à quai" (proche du lieu d'enlèvement) ;
- le transport entre plates-formes (massification pour réduire les coûts) ;
- le dégroupage sur une plate-forme dite de "passage à quai" (proche du lieu de livraison) ;
- la distribution du colis au destinataire (ou livraison).

Cet enchaînement mobilise des acteurs qui peuvent avoir des caractéristiques très variées avec une couverture produit et/ou géographique plus ou moins grande. On repère ainsi en France une quinzaine de messagers de taille nationale et plusieurs milliers de "petites" entreprises qui interviennent souvent comme sous-traitantes.

De façon générale on distingue dans la messagerie trois catégories principales :

- **les généralistes**, ils livrent dans un délai de 48 heures les colis (conditionnés principalement sous format cartons et palettes) qui leur sont confiés ;
- **les expressistes**, ils garantissent une livraison avant 12 h pour tout colis qui est enlevé la veille avant 18 h ;
- **les monocolistes**, ils traitent le colis unique qui rentre dans un format calibré par le poids (généralement inférieur à 30 kg) et les dimensions. On parle de transport en "monocolis", chaque fois que la facturation se fait au colis et non à l'envoi ou au lot (ensemble des colis remis en même temps à un transporteur pour être envoyé à un même destinataire).

Les frontières entre ces offres sont de plus en plus floues, ainsi le suivi autrefois réservé aux monocolistes, puis aux expressistes, c'est généralisé et tous les clients ont accès directement (via internet) au parcours effectué.

---

<sup>1</sup> Un colis se définit comme suit : "un objet ou un ensemble matériel composé de plusieurs objets, quels qu'en soient le poids, les dimensions et le volume, constituant une charge unitaire lors de la remise au transporteur (caisse, carton, conteneur, fardeau, palette cerclée ou filmée par le donneur d'ordre, roll, etc.) même si le contenu en est détaillé dans le document de transport" (décret n°99-269 applicable aux transports publics routiers de marchandises)

Dans tous les cas, **la notion de réseau est stratégique** ; l'objectif étant toujours d'avoir un service optimum quant aux territoires desservis et à la qualité de service offerte (qui se mesure notamment en terme de fiabilité dans les plages horaires annoncés).

A l'heure de la globalisation, de l'ouverture des marchés, de la déréglementation des services postaux, ce secteur est en forte évolution avec tout à la fois une concentration (achats d'entreprises / développement de partenariats à l'échelle mondiale) et une spécialisation (par entreprise ou à l'intérieur des groupes).

## 1.2. Le projet.

La présente recherche s'adresse au segment origine ou destination de la chaîne reliant le producteur (chargeur amont) au destinataire (chargeur aval). L'analyse porte sur :

- l'organisation de la ramasse et de la distribution ;
- la localisation des plates-formes de groupage/dégroupage ;
- les moyens mis en œuvre pour desservir les zones urbaines.

En fait, nous sommes partis d'un double constat qui est valide dans toutes les grandes villes françaises :

- **les installations physiques qui articulent les flux urbains / interurbains sont les véritables "pilotes" du système logistique urbain** et déterminent grandement l'économie et la qualité du service rendu. Une localisation éloignée du barycentre est synonyme de multiplication des coûts d'approche et de difficulté à maîtriser les délais de livraison ;
- **ces outils ont de plus en plus de difficulté à se maintenir à proximité des zones urbaines** pour des raisons urbanistiques (impossibilité réglementaire de s'installer), politiques (rejet d'outils jugés créateurs de nuisances), économiques (coût du foncier prohibitif). Pourtant tout éloignement induit pour la collectivité une perte d'efficacité globale avec un accroissement des GES et autres émissions de polluants.

L'hypothèse à vérifier est qu'une localisation de plate-forme en zone urbaine permet de présenter un bilan économique, environnemental, social amélioré car un tel positionnement permet, sans modifier le rôle et les responsabilités des différents acteurs de la chaîne logistique, d'agir sur deux paramètres fondamentaux de la circulation des marchandises en ville :

- l'organisation de la distribution et des enlèvements ;
- le type et la flotte des véhicules mis en service.

Le projet ambitionne donc de définir **quel est le meilleur couple positionnement de la plate-forme /organisation des tournées**.

L'objectif est de définir sur la base d'une modélisation des flux l'emplacement idéal pour créer une - ou plusieurs - ZLU (zone logistique urbaine) et à partir de ce lieu quel type de véhicules est le plus approprié pour répondre aux attentes des acteurs professionnels (qui se mesurent principalement par l'aspect économique du schéma de desserte) et institutionnels (qui se focalisent plus particulièrement sur l'aspect environnemental de la circulation des marchandises).

## 1.3. Les données

Pour étayer notre approche, des données quantitatives et fonctionnelles sont nécessaires. Aujourd'hui, les éléments disponibles sur le sujet sont principalement :

- **Les enquêtes conduites dans le cadre du Programme National Marchandises en Ville (PNMV)** conduites dans 3 villes françaises (Bordeaux, Dijon, Marseille). Fondatrices de la recherche sur la logistique urbaine, ces enquêtes datent de 1996 – *alors que les paramètres sur la demande et l'organisation de la ville ont sensiblement changés* – et sont aujourd'hui relancées, mais les résultats ne seront disponibles qu'à partir de 2012 ;
- **L'enquête trimestrielle réalisée par le service statistique du ministère** en charge des transports (le SOeS) en partenariat avec TLF qui fournit des renseignements sur l'activité messagerie de 23 groupes de ce secteur. Les variables étudiées sont le tonnage expédié, le nombre d'envois, le chiffre d'affaires hors taxes (CAHT) correspondant. Ces données générales expliquent l'évolution mais ne donnent que peu d'indications sur les pratiques.

Aussi, nous avons procédé à une enquête spécifique pour alimenter le modèle qui sera mis en œuvre. **La ville choisie comme référence est Marseille, et dans cette agglomération nous avons interrogés les principaux messagers sur leur activité.** La liste des messagers interviewés est disponible en annexe.

Les résultats sont présentés ci-après.

## 2. L'enquête réalisée.

### 2.1. Les entretiens.

Pour avoir une vision aussi précise que possible des conditions dans lesquelles les messagers desservent la ville de Marseille, une enquête a été conduite auprès des entreprises présentes sur la place.

Ainsi **13 entretiens** ont été réalisés durant les mois de mars et avril 2010 auprès des principaux groupes nationaux et internationaux installés localement. Si ce nombre ne représente qu'environ le tiers des messagers qui travaillent sur les Bouches-du-Rhône (sous-traitants compris), il porte sur **la très grande majorité des envois : probablement 80 %**. C'est cette dernière valeur que nous avons pris comme base pour déterminer le quantitatif présenté ici (valeurs obtenues par les enquêtes + 20%)

Nous estimons que ces contacts nous ont permis d'avoir une vision sur les pratiques des professionnels face aux deux composantes de l'organisation que sont :

- **la demande** (les volumes, la localisation, les exigences, ...)
- **la ville** (les contraintes, les possibilités d'installation, la circulation, ...)

Tous éléments qui expliquent les choix en matière de fonctionnement et de localisation des investissements.

## 2.2. Le fonctionnement local.

En dehors du groupe "La Poste" qui a développé une organisation spécifique pour traiter le monocolis, toutes les entreprises rencontrées ont un schéma fonctionnel identique pour traiter l'ensemble de la demande (messagerie, express, monocolis).

De façon générale, il est à noter :

- **Les agences administratives couvrent l'ensemble du département** et non la seule ville de Marseille (ou même la seule agglomération).
- **La ville de Marseille est rattachée aux Bouches-du-Rhône**, seuls deux messagers ont une organisation spécifique pour cette zone urbaine.
- L'exploitation (notamment pour la mise en place des tournées) distingue Marseille du reste du département ; **seule la ville d'Aubagne et l'Est des Bouches-du-Rhône est dans quasiment tous les cas traitée avec Marseille.**

Dans ce qui suit, nous nous adressons donc à **environ 900 000 habitants**. Marseille est la deuxième commune la plus peuplée de France (852 400 habitants en 2007) à laquelle il faut rajouter la zone Est du département soit environ 50 000 habitants. Ceci représente 45 % de la population du département.

## 3. Les plates-formes messagers.

Les évolutions de ces deux dernières décennies tant dans les méthodes de travail (intégration massive de la gestion des flux d'information, nouvelles procédures administratives, application de normes sur la sécurité, ...) que dans le volume traité (augmentation de la demande, regroupement d'entreprises, segmentation par secteurs d'activité, ...) ont nécessité de nouveaux investissements.

En effet, l'agrandissement sur place a rarement été possible (non souhaitée par les collectivités, manque de foncier, ...) ; aussi le parc des principaux messagers (notamment ceux enquêtés) est relativement récent.

### 3.1. Les surfaces.

Pour desservir les Bouches-du-Rhône – *sur la base des enquêtes effectuées* – nous estimons que **l'ensemble des messagers utilisent 75 000 m<sup>2</sup> de "quais"** (surface nette consacrée à l'exploitation).

Les entreprises qui réalisent l'essentiel du marché ont **chacune de 2000 m<sup>2</sup> à 6000 m<sup>2</sup> de quai**; les « locatiers » (ceux qui livrent ou ramassent pour le compte des messagers) ont essentiellement des places de parking (ceci étant une des raisons qui tend à éloigner de Marseille ces professionnels).

A cette valeur qui correspond aux espaces de transfert (passage à quai), il y a lieu de rajouter les **surfaces de bureau, soit 25% supplémentaires**. Le total construit est donc pour le département d'**environ 95 000 m<sup>2</sup>**.

**La ville de Marseille représente de 40 à 50 % de ce montant** ; les entreprises ont confirmé la proportion obtenue avec le rapport des populations (Marseille + Aubagne / Département). Il est à

noter que les messagers qui sont plus particulièrement centrés sur les enlèvements affichent des valeurs légèrement inférieures (35 à 40 %), ce qui est logique au vu de la répartition des emplois.

Nous retiendrons donc un **besoin de 45 000 m<sup>2</sup> pour la desserte de la ville de Marseille** (plus Aubagne), décomposés en 35 000 m<sup>2</sup> de surfaces d'exploitation et 10 000 m<sup>2</sup> de bureaux. Il est néanmoins à noter que ceci reste théorique car pour la majorité des professionnels il n'y a pas – *et il n'y aura vraisemblablement pas à moyen terme* – de dissociation dans la desserte du département et de la ville.

**La messagerie ne représente donc qu'une faible part (environ 10 %) de l'immobilier consacré à la logistique urbaine.** En effet, l'essentiel des besoins est lié à la mise en marché de produits à forte fréquence d'utilisation (type produits périssables sur le MIN), à l'articulation des flux inter entreprises, aux stocks déportés de commerces, ... Néanmoins des connexions évidentes entre la messagerie et ces espaces existent.

Signalons enfin que ces valeurs correspondent aux seules plates-formes de la messagerie « traditionnelle ». Aujourd'hui de nouvelles activités en interface entre les consommateurs et les transporteurs (points relais, bases pour des sous-traitants utilisateurs de moyens « propres », locaux dédiés au e-commerce, ...) se développent. Les surfaces (généralement comprises entre 300 et 500 m<sup>2</sup> par opérateur) sont encore modestes (le total pour Marseille doit représenter environ 2000 m<sup>2</sup>) mais pourraient évoluer de façon significative dans les prochaines années.

### 3.2. Les localisations.

La localisation est devenue pour les entreprises du secteur de la messagerie un enjeu majeur. Les raisons en sont **fonctionnelles** (se rapprocher du client permet de fiabiliser les connexions avec ce dernier et ouvrir le champ de plusieurs dessertes dans la journée), **économiques** (les coûts d'exploitation prennent de plus en plus le pas sur les coûts d'investissement), **sociales** (la fidélisation du personnel et son attachement à l'entreprise deviennent centrales dans la recherche de la qualité du service).

Si le positionnement des plates-formes était dans les années 1980 / 1990 souvent déterminé par une offre jugée financièrement intéressante, aujourd'hui les messagers se focalisent sur la situation géographique. Les conséquences se retrouvent en termes de coût (part supplémentaire dans les bilans) et dans la propriété (augmentation du pourcentage de plates-formes en location).

**L'enquête montre que deux zones majeures existent** pour la localisation des messagers (hors sous-traitants) qui desservent le département des Bouches-du-Rhône (et donc la ville de Marseille) :

- **Le pourtour de l'étang de Berre** (principalement sur les communes de Vitrolles/Marignane) où l'on comptabilise environ 30% des surfaces ;
- **Marseille Nord** (la quasi-totalité se retrouvant dans les 2<sup>ème</sup>, 14<sup>ème</sup> et 15<sup>ème</sup> arrondissements) qui représente 60 % des surfaces.

Les 10 % qui restent sont répartis dans plusieurs communes, toutes au Nord du chef-lieu. En effet, les flux qui arrivent ou partent de Marseille viennent tous (plus de 90%) du Nord, et il est naturel de se positionner dans cette direction afin d'éviter une traversée de la ville (une des rares en France où il n'y a pas de rocade).

**Marseille Nord est perçu comme le lieu idéal** pour les spécialistes de **l'express** et ceux qui œuvrent majoritairement dans **la distribution** (affirmation moins marquée pour ceux qui font beaucoup de ramasse).

## 4. L'organisation.

Le marché est fortement concurrentiel et **les clients arbitrent entre le prix du service et le respect de leurs exigences** qui peuvent être très variables selon les diverses catégories de "chargeurs". Ces derniers peuvent être classés comme suit :

- **les commerçants** qui se font approvisionner régulièrement pour répondre à des demandes généralement urgentes ;
- **les producteurs** (industriels, artisans, ...) qui reçoivent et expédient des envois qui peuvent avoir des dimensions et poids importants ;
- **les services** (du secteur privé ou public) dont certains sont des gros usagers de la messagerie généraliste et express ;
- **les habitants** de la ville qui ont de plus en plus recours à la messagerie, en lien notamment avec leurs actes d'achats par e-commerce (monocolis).

Pour répondre aux besoins exprimés, les messagers mettent en place une offre où trois éléments occupent une place majeure : la plate-forme de réception/expédition, le système de gestion de l'information, la sous-traitance.

### 4.1. Le cadre fonctionnel.

Pour répondre à des contraintes temporelles de plus en plus fortes, les entreprises se mécanisent (environ la moitié des colis traités sur Marseille). L'objectif visé au travers de la mise en œuvre de ces technologies de tri n'est pas économique (le coût rapporté au colis est plus élevé) mais fonctionnel (cela permet de traiter plus rapidement les envois et donc d'améliorer la qualité de service).

Selon les informations recueillies, le respect des engagements en termes de délais est largement tenu, puisqu'il est affiché (moyenne des "dires" de nos interlocuteurs) :

- **pour les messagers généralistes et les monocolistes une livraison à J+1 (24 h après envoi) dans 90% des cas**, les 10% qui restent le sont le lendemain (48h) ;
- **pour l'express, le délai est garanti** (lendemain avant 13h) et est respecté dans la très grande majorité des cas (entre 95 et 98 %).

En ce qui concerne les livraisons et enlèvements, toutes les entreprises considèrent que **le rôle du chauffeur livreur est primordial**. Ce dernier doit connaître parfaitement le secteur à desservir afin d'éviter les pertes de temps (dues notamment aux adresses qui sont soit incomplètes, soit inexactes dans environ 5% des cas). A ce sujet, il est généralement noté qu'il n'y a pas de difficulté à trouver de bons chauffeurs livreurs (en direct ou chez les sous-traitants), la récente crise économique ayant limité le "turn over".

## 4.2. L'aspect commercial.

Le donneur d'ordre est dans la très grande majorité des cas (plus de 90 %) situé à l'amont, ce qui conduit à une déconnexion entre celui qui reçoit (le client « marseillais ») et le messenger.

De fait, les contacts commerciaux conduits par les professionnels locaux – à l'instar de ce que l'on retrouve dans toutes les autres villes – se limitent aux relations conséquentes à l'enlèvement des marchandises.

Ce particularisme propre à la logistique urbaine entraîne une absence de contacts qui est certainement préjudiciable à la recherche de solutions satisfaisantes pour les diverses parties, notamment en matière d'heure de livraison (on ne se "connait" pas).

Le suivi des colis est central dans le fonctionnement ; toutes les entreprises contactées (quelle que soit leur spécialisation) offrent ce service. Ceci montre à l'évidence que **la maîtrise de l'information est au cœur du système mis en place pour relier l'amont et l'aval ; elle est devenue l'élément clé de l'organisation.**

## 5. Les tournées.

L'organisation des tournées de livraison ou de ramasse est un problème que les messageries doivent résoudre tous les jours ; il n'y a pas de régularité établie et les adaptations sont permanentes.

L'optimisation des tournées est tout à la fois complexe dans sa mise en œuvre et centrale dans la recherche de compétitivité ; cette opération entend toujours répondre à des objectifs stratégiques et commerciaux en lien (ou même parfois en anticipation) avec les exigences des clients.

Pour cela les entreprises associent une approche empirique (basée sur la connaissance des lieux) et technologique (utilisation de plus en plus forte des programmes informatiques de routage). Les facteurs à combiner sont multiples et portent notamment sur :

- les véhicules disponibles (dimension, motorisation, présence ou non de hayon, ...) ;
- les ordres de commande (réceptionnés souvent le matin même) ;
- les fenêtres horaires (définies par la réglementation et les souhaits des clients).

### 5.1. Les services mis en place.

*Nota : les données qui suivent n'intègrent pas Coliposte, la spécificité de cette entreprise monopoliste (grand nombre d'envois de faible volume) s'appuie en effet sur des pratiques distinctes qui viendraient modifier de façon sensible les valeurs indiquées ci-après.*

Le nombre de tournées pour desservir l'agglomération de Marseille/Aubagne (messagers + expressistes) est estimé à **390 en livraison et 260 en enlèvement** (il y a couplage dans environ 20%

des cas), ce qui signifie qu'en heure de pointe du matin il y a 390 véhicules utilitaires de messagerie dans Marseille<sup>2</sup>.

Ces tournées ont un rythme temporaire bien établi et, selon les réponses recueillies auprès des messagers qui desservent Marseille :

- **la distribution se fait dans 90 % des cas le matin entre 8h et 12h30.**
- **l'enlèvement a lieu essentiellement l'après-midi de 14h30 à 17 h.**

Le nombre de tournées est variable selon le volume traité ; la relation 1 tournée = 1 arrondissement (approximativement) est présente chez 1/3 des entreprises – *ce qui donne de 15 à 18 tournées* –.

Le calibrage des tournées peut être variable selon le jour de la semaine et/ou la période de l'année. Notons enfin que **la distance parcourue lors des tournées est de 50 à 180 km** (le critère de localisation de la plate-forme est déterminant).

Quant à la clientèle, elle se répartit en trois tiers d'importance sensiblement égale :

- **les activités de production** (inter-entreprises, petite et moyenne industrie). Les envois et les réceptions sont ici d'égale importance et rassemblés géographiquement (l'essentiel se fait sur les zones d'activité périphériques au centre ville) ;
- **les activités commerciales** avec une nette domination des réceptions par rapport aux expéditions (de l'ordre de trois pour un). Les flux intéressent les zones denses et sont diffus à l'intérieur de celles-ci;
- **les services privés** (type banques, cabinets divers, ...) **et publics** (type hôpitaux, lycées, ...) **et les particuliers** avec ici encore une domination des réceptions (moins marquée en express). Ces flux sont diffus sur l'ensemble de la ville.

## 5.2. Les moyens utilisés.

**Les véhicules utilisés sont de tout gabarit et quasiment tous thermiques** (très majoritairement aux normes euro 3 et 4), la répartition est la suivante

- 38 % ont un tonnage inférieur à 3.5 T ;
- 40 % ont un tonnage compris entre 7 et 13 T ;
- 20 % ont un tonnage compris entre 13 et 23 T,
- Enfin quelques semi-remorques (pour la ramasse essentiellement).

**La non utilisation de véhicules propres** (électrique, gaz) est due selon les messagers au surcoût lors de l'achat (rapporté au km, le différentiel est de l'ordre de 30%) et à l'absence d'offre en accord avec leurs exigences fonctionnelles (garantie de distance parcourue). Quelques messagers depuis peu ont mis en service des véhicules électriques (avec une campagne de communication associée)

---

<sup>2</sup> Ces véhicules, dès lors qu'ils desservent des zones denses en centre ville, stationnent majoritairement sur voirie en double file, ce qui conduit parfois à un "blocage" de la circulation pour les autres usagers (transports publics, automobilistes, ...)

**La sous-traitance est largement majoritaire : elle concerne approximativement les 2/3 des véhicules en circulation. Elle est toujours présente, que ce soit comme schéma dominant (jusqu'à atteindre 100 % de l'activité pour 1/3 des entreprises) ou comme variable d'ajustement pour répondre aux évolutions rencontrées selon les jours/saisons (ou pour desservir certains quartiers et/ou clients).**

## **6. Les volumes traités.**

*Ici encore, nous ne prendrons pas en compte le groupe La Poste pour ces spécificités (notons aussi que c'est la seule entreprise contactée qui ait été réticente à nous fournir des indications quant à leurs pratiques).*

Les mouvements comptabilisés s'expriment en tonnages livrés ou enlevés et en nombre de positions<sup>3</sup>. Des correspondances existent entre ces deux unités de compte ; la première faisant plus référence à l'aspect financier (et commercial), l'autre étant plus représentative de l'aspect fonctionnel.

### **6.1. Le quantitatif.**

A partir des renseignements obtenus (réajustement fait pour tenir compte des 80 % d'envois estimés enquêtés), nous retiendrons pour la ville de Marseille (Aubagne compris) en messagerie (le groupe La Poste non pris en compte) :

- le **volume distribué** correspond à **1200 tonnes / jour moyen** ;
- le **volume ramassé** correspond à **820 tonnes / jour moyen**.

L'ensemble (distribution + ramasse) représente donc approximativement **2000 tonnes chaque jour**, soit – *ramené à la population ici prise en compte (900 000 habitants)* – **2.2 kg par marseillais et par jour**.

Le **nombre de positions** effectuées (les clients desservis) est quotidiennement de **12 500 pour la distribution** et de **7 000 en ramasse**.

Ceci permet de définir le **poids moyen traité lors de chaque arrêt** :

- **96 kg en livraison**
- **110 kg en enlèvement**

**La charge moyenne par véhicule est de 3 tonnes pour les véhicules de livraison**, ce qui, mis en parallèle avec le type de véhicule utilisé – *40 % d'entre eux ont un PTAC compris entre 7 tonnes et 13 tonnes* – tendrait à montrer que le taux de remplissage est particulièrement bon (c' est un impératif absolu pour la rentabilité des entreprises).

---

<sup>3</sup> Une " position " correspond à un arrêt de véhicule pour desservir un client (livraison ou enlèvement d'un ou plusieurs colis )

**Cette charge moyenne devient 3.2 tonnes en ramasse** (valeur qui semble faible compte tenu des pratiques décrites, mais qui s'explique probablement par la difficulté qu'ont eu nos interlocuteurs à séparer l'enlèvement de la livraison dans le cas des tournées mixtes).

Enfin, cela donne une moyenne de **32 arrêts par tournée de livraison** et de **25 par tournée de ramasse**.

## 6.2. Le conditionnement.

Le conditionnement est toujours un élément majeur dans l'analyse de cette activité, c'est en effet lui qui détermine le type de véhicule (dimension, tonnage, présence de hayon, ...) et son plan de charge (avec le temps imparti).

**Les deux conditionnements majoritaires (environ 85 % du tonnage) sont la palette** (de 25 à 30 % des envois) de poids moyen 85 kg **et le colis carton** (un peu plus de 50 % des envois) de poids moyen 32 kg.

**Le nombre de colis (palette et/ou carton) par position est pour la messagerie généraliste égal à environ 3, cette valeur étant plus faible chez les expressistes : de l'ordre de 2.**

## 7. Les jugements émis sur l'activité.

En complément d'entretien, des prises de position à caractère général sur le métier de messager ont été portées par nos interlocuteurs. Nous listons ci-dessous les points qui sont partagés par la très grande majorité des messagers marseillais.

La messagerie, après une forte évolution au cours de la période 2000 / 2007 (les flux étaient 2 fois supérieurs à ceux observés dans le transport de lots) a été confrontée à la crise économique des années 2008/2009. Au plus fort de cette récession, la baisse du chiffre d'affaires a été de l'ordre de 10% alors que le nombre d'envois baissait de façon moins élevée. Aujourd'hui (depuis le quatrième trimestre 2009) la décroissance est enrayée et l'on remarque une légère reprise.

De façon générale ce sont les généralistes qui ont le plus souffert, ensuite les expressistes, enfin les monocolistes qui portés par le forts développement du e-commerce (20% l'an) ont moins ressenti les effets de la crise.

Cette dégradation des conditions économiques est ressentie fortement dans les agences locales et ces récentes difficultés se traduisent par des réactions qui peuvent être perçues comme contradictoires :

- les problèmes entraînent un **rejet systématique de toutes mesures "administratives"** qui seraient prises dans l'usage de la voirie ;
- il existe incontestablement **une volonté d'agir pour "mieux" desservir la ville** en intégrant l'aspect environnemental de l'activité.

Parmi les contraintes fonctionnelles vécues journalièrement dans l'exercice de leur profession, la plus perturbante est certainement celle de **l'heure de livraison** (le cas des enlèvements n'est pas évoqué).

L'on assiste de plus en plus à une **distorsion entre les exigences des commerçants** (qui veulent être livrés dès l'ouverture de leur magasin – *laquelle se fait de plus en plus tardivement* –) **et celles des autres entreprises** : industrie, services, administrations (qui souhaitent être livrés de plus en plus tôt). Ceci pose d'énormes problèmes de « calage » des tournées.

Par ailleurs, **la desserte des particuliers** (qui concerne essentiellement le monocolis) en augmentant de façon importante **devient un sujet de préoccupation** ; selon plusieurs professionnels locaux, le modèle actuel basé sur la mixité des clients ne pourra pas durer longtemps si les tendances actuelles se poursuivent. On rejoint ici la problématique de la localisation de la plate-forme ; la montée en puissance du e-commerce et de l'express tendent à orienter la demande vers deux dessertes par jour. Dès lors une base à Marseille devient une quasi obligation.

Pour améliorer les performances de la logistique urbaine, **les messagers ne mettent pas en avant la nécessité d'une amélioration des conditions de circulation et de stationnement**. Ces dernières sont certes difficiles, mais intégrées comme une fatalité.

En fait, toutes les solutions considérées comme intéressantes pour demain sont liées aux ruptures de charge, avec deux axes :

- **la localisation de leur plate-forme**. Ce thème est le plus mobilisateur ; la possibilité de s'installer au plus près du barycentre de leur clientèle dans des conditions économiques (coût de location ou d'acquisition) et fonctionnelles (accessibilité routière) satisfaisantes est jugée nécessaire pour faire évoluer positivement la desserte de Marseille ; ceci tant pour la collectivité que pour la profession.
- **La création de points relais**. A condition qu'ils ne soient pas "imposés" par la puissance publique, ces derniers sont jugés intéressants dans certains cas (zones les plus problématiques) ; il est toutefois mis en avant le coût de cette solution, difficilement compatible avec le marché actuel.

## ANNEXE : liste des messagers interviewés

<b><i>Sociétés</i></b>	<b><i>Adresse</i></b>
DHL Express	zac Saumaty Séon - RUE LE PELLETIER 13016 Marseille
Calberson Méditerranée	zac Anjoly - voie Irlande - 13127 Vitrolles
Chronopost International	Agence de Marseille centre PF d'Arenc – 14, rue d'Anthoine - 13002 Marseille
France Express 13 (GEODIS) / France Colis Express	205 Avenue des Aygaldes - 13015 Marseille
Sernam	Zone Clésud - Ilot 3 - 13140 Miramas
Buonomo Distribution	PF logistique d'Arenc - 14 rue d'Anthoine - 13002 MARSEILLE
GEFCO	Chemin Chabauds - 13320 Bouc Bel Air
Schenker-Joyau	zac Eurofloryparc - 13130 BERRE L'ETANG
Chronotrans	27 Bastide Neuve - 13105 MIMET
Dachser-Graveleau	172 CHE DE SAINT LOUIS AU ROVE - 13016 Marseille
Transports rapides Besson	201 AVENUE DES AYGALADES - 13015 Marseille
Transports Mazet	35 BOULEVARD FREDERIC SAUVAGE - 13014 Marseille
Exapaq (DPD)	Av Denis Papin - 13340 ROGNAC
Transports Henri Ducros	17, rue de berlin - 13127 Vitrolles
TNT Express Sud Est	Aéroport Marseille Provence - BP 132 – 13729 Marignane
La Poste - ColiPoste	Cavaillon

# PLANIFICATION STRATEGIQUE POUR LA LOGISTIQUE URBAINE VERTE : ETAT DE L'ART

Ce document est une étude de synthèse sur les problématiques impliquant des décisions stratégiques en logistique urbaine (*city logistics*). Cette problématique a en charge de définir de nouveaux schémas d'organisation, respectueux de l'environnement, dédiés aux agglomérations. Les villes, à la fois lieux de vie et de travail, ont en effet un mode de fonctionnement complexe qui nécessite une logistique spécifique. Nous définissons dans un premier temps ce qu'est exactement la logistique urbaine et présentons quelques moyens logistiques dédiés, déjà utilisés par certaines agglomérations : les *Espaces Logistiques Urbains*. Nous introduisons ensuite deux problématiques stratégiques centrales en logistique (et par extension, en logistique urbaine) : le problème de conception de réseau (*network design problem*) et le problème de localisation de sites (*facility location problem*). Ces deux modèles génériques, très étudiés en recherche opérationnelle, sont des problèmes décisionnels pouvant jouer un rôle majeur dans la mise en place physique de solutions innovantes, définies par les économistes, pour une meilleure organisation de l'outil logistique urbain des grandes agglomérations. Une liste de travaux de la recherche opérationnelle, où ces problèmes ont été appliqués à la logistique urbaine, est présentée dans cet article. Enfin, nous nous intéressons à la prise en compte du facteur *développement durable* dans les problématiques dédiées à la logistique en général, et à la logistique urbaine en particulier.

## 1. Introduction

La circulation des marchandises est une donnée importante dans l'économie locale des villes et dans la qualité de vie de ses habitants (particuliers et professionnels). Le fonctionnement d'une ville implique en effet mécaniquement des échanges de marchandises et le volume de ces derniers est reconnu comme étant un bon indicateur de la dynamique des zones urbaines.

Ces déplacements engendrent malheureusement des conditions de circulation qui se dégradent sans cesse dans des villes de plus en plus polluées et congestionnées. De nouveaux schémas logistiques, respectueux de l'environnement, doivent donc être réinventés pour mieux coller au mode de fonctionnement des agglomérations. C'est dans cette optique qu'est étudiée depuis quelques années une nouvelle problématique : la logistique urbaine verte (*green city logistics*).

Cet article est une étude de synthèse sur les problématiques impliquant des décisions stratégiques en logistique urbaine (*city logistics*). Nous définissons dans un premier temps ce qu'est exactement la logistique urbaine et présentons quelques moyens logistiques dédiés, déjà utilisés par certaines agglomérations : les *Espaces Logistiques Urbains* (Section 2). Nous introduisons ensuite, dans la section 3, deux problématiques stratégiques centrales en logistique (et par extension, en logistique urbaine) : le problème de conception de réseau (*network design problem*) et le problème de localisation de sites (*facility location problem*). Ces deux modèles génériques, très étudiés en recherche opérationnelle, sont des problèmes décisionnels pouvant jouer un rôle majeur dans la mise en place physique de solutions innovantes, définies par les économistes, pour une meilleure organisation de l'outil logistique urbain des grandes agglomérations. La section 3 est d'ailleurs dédiée à la présentation de travaux de la recherche opérationnelle où ces problèmes ont été appliqués à la

logistique urbaine. Enfin, nous nous intéressons à la prise en compte du facteur *développement durable* dans les problématiques dédiées à la logistique en général, et à la logistique urbaine en particulier (Section 4).

## 2. Logistique urbaine et Transport de Marchandises en Ville

### 2.1 Contexte et définitions

Le déplacement des marchandises (y compris les déplacements d'achat) génère une part importante des flux motorisés en ville. Les marchandises représentent environ 13 à 20% de l'ensemble des déplacements dans une agglomération comptabilisés en véhicules-kilomètres équivalent voiture particulière (Dufour et al., 2007). De même, on estime à 25% le taux d'occupation de la voirie urbaine par des véhicules motorisés (en circulation ou en stationnement) dévolus au transport des marchandises (Dufour et al., 2007).

Ces déplacements nécessaires à la dynamique des villes ne vont toutefois pas sans quelques désagréments (Crainic, 2008).

Au niveau fonctionnel tout d'abord, le partage de la voirie et des places de stationnement entre véhicules dédiés au transport de passagers (publics et privés) et ceux liés au transport de marchandises contribuent significativement à la forte congestion des voies urbaines ressentie dans toutes les grandes agglomérations. A titre indicatif, on estime qu'en France, la part d'occupation de la voirie, entre 9h et 11h un jour de semaine, par les véhicules en circulation n'est que de 14% par rapport à l'ensemble des véhicules en circulation et en stationnement. D'autre part, on sait aussi que les véhicules dédiés au transport de marchandises stationnement sur des emplacements illicites dans 60% à 80% des cas (Dufour et al., 2007).

Au niveau économique ensuite, le transport de marchandises en milieu urbain est un maillon crucial de la chaîne logistique des acteurs de ce secteur. Les coûts induits, aussi bien au niveau des infrastructures que des coûts de desserte, par la circulation de marchandises en milieu urbain ne peuvent pas être négligés. La livraison du *dernier kilomètre* est en effet la plus coûteuse, elle représente 20% du coût total de la chaîne de distribution (Interface transport et al., 2009).

Au niveau environnemental enfin, le transport de biens dans les agglomérations est responsable d'une part importante de la pollution atmosphérique et sonore subie par les citoyens. En effet, en France, 50% du gazole consommé en ville et 25% du CO<sub>2</sub> émis sont imputés au transport de marchandises (Dufour et al., 2007). Un rapport de l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE) (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2003) estime pour sa part que 43% d'oxyde de soufre (SOx) et 61% des particules en suspension (PM) émises à Londres sont dues au transport de marchandises. De même, ce rapport assure que la part en émissions en oxyde d'azote (NO) à imputer au transport de biens en milieu urbain est de 28% à Londres, 50% à Prague et 77% à Tokyo.

Bien que déjà préoccupants, ces chiffres ne risquent malheureusement pas de diminuer à très court terme. La quantité de marchandises transportée en milieu urbain augmente régulièrement, et est supposée encore augmenter à taux régulier (Crainic, 2008). Beaucoup de facteurs liés au mode de fonctionnement des entreprises mais aussi au mode de consommation des particuliers tendent en effet à favoriser une multiplication de ces transports. On peut par exemple évoquer la tendance à un

fonctionnement en flux tendu des entreprises (pour éviter des stocks coûteux et de la place perdue), la modification des comportements d'achat des particuliers (le symbole le plus probant étant l'explosion du e-commerce (Durand, 2010 ; Feys, 2010)) et le recentrage de l'appareil commercial en centre-ville. Cette augmentation planifiée de trafic de marchandises en milieu urbain s'explique aussi par la densification prévue des grandes agglomérations. L'OCDE estime par exemple que la population urbaine de ses pays membres, qui représentait 50% de la population totale en 1950 et 77% en 2000, devrait atteindre 85% en 2020.

Longtemps sous-estimés par rapport au transport de passagers, les enjeux liés à la distribution urbaine et les problèmes de transport qu'elle pose dans les agglomérations sont, depuis une vingtaine d'années, mieux considérés par les collectivités. En France, la loi sur L'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie (LAURE) en décembre 1996 puis la loi Solidarité et Renouvellement Urbain (SRU) en décembre 2000 ont par exemple obligé les villes à intégrer la distribution urbaine des marchandises dans leurs Plans de Déplacements Urbains. Depuis 1996, un *volet marchandises* doit en effet obligatoirement être intégré au Plan de Déplacement Urbain (PDU) de toute agglomération urbaine française de plus de 100 000 habitants. Cette législation renforcée, mais aussi les initiatives et expérimentations menées partout dans le monde (notamment en France avec le Programme National Marchandises en Ville mis en place fin 1993 (Interface Transport, 2004 ; Gérardin Conseil, 2007), en Europe avec entre autres les actions COST et le réseau BESTUFS ou au Japon (Taniguchi et al., 1999)) ont permis de mieux appréhender cette question de l'efficacité des systèmes de transport de marchandises dans les agglomérations. Cependant, le chemin vers une gestion optimale de la distribution urbaine semble être encore long (Dablanc, 2007).

Une définition formelle de l'étude de ces systèmes particuliers de transfert de marchandises en ville a été proposée dans Taniguchi et al. (2001) puis traduite de l'anglais dans Papaux (2006) ; on parle ainsi désormais de logistique urbaine (*city logistics*). La logistique urbaine est alors définie comme étant *le procédé par lequel on optimise les activités de logistique et de transport des compagnies privées avec l'aide de systèmes d'information avancés pour la gestion du trafic, de sa congestion, de la sécurité et des ressources d'énergie dans les agglomérations, à l'intérieur d'une économie de marché*. La logistique urbaine entend ainsi considérer, sous plusieurs critères d'évaluation, le flux des marchandises en milieu urbain sur l'ensemble de leur chaîne logistique, depuis le producteur jusqu'au client en passant par des zones de stockage/entrepôt/dégrouper éventuelles.

Le Transport de Marchandises en Ville (TMV), qui concerne tous les transports de marchandises au départ ou à destination des secteurs urbains, apparaît alors clairement être un maillon prépondérant de la logistique urbaine. Dans sa définition originelle (MEEDM et ADEME, 2004), le TMV se constitue de trois composantes essentielles :

- les flux relatifs aux établissements commerciaux, industriels ou tertiaires du secteur privé ;
- les déplacements effectués par les particuliers pour s'approvisionner (les déplacements d'achats) ;
- les autres flux désignés comme flux *annexes*. Ils correspondent aux flux de marchandises occasionnés par les autres activités telles que le transport de déchets, les besoins propres des services publics, les déménagements, les livraisons à domicile, les services postaux, les hôpitaux.

## 2.2 Espaces Logistiques Urbains

Le besoin de desserte de marchandises en milieu urbain s'appuie nécessairement sur des plateformes, installations physiques qui sont les véritables *pilotes* du système logistique urbain. Ces équipements d'articulation des flux peuvent jouer différents rôles : stockage, entreposage, dégroupage... Ces installations ont largement quitté les agglomérations pour s'installer dans des périphéries toujours plus éloignées. Les raisons sont multiples : urbanistiques (impossibilité réglementaire de s'installer), politiques (rejet d'outils jugés créateurs de nuisances), économiques (coût du foncier prohibitif). Pourtant il est évident qu'un positionnement éloigné du barycentre urbain induit un allongement des distances parcourues, une perte d'efficacité globale, un accroissement des Gaz à Effet de Serre et autres émissions de polluants. Aussi, nombre d'acteurs tant institutionnels que professionnels s'accordent à reconnaître l'utilité de démarches visant à repositionner les plateformes au plus près du consommateur (CBRE, 2009). Marseille est un exemple concret de ce constat, la logistique urbaine de cette grande agglomération française tend en effet aujourd'hui vers un véritable retour à la proximité (Moiroux, 2009).

Les besoins en installations logistiques des villes portent sur des surfaces de terrain de taille conséquente. Selon le Programme de Recherche et d'Innovation dans les Transports Terrestres en France (PREDIT), 10 à 15 hectares de zones logistiques urbaines sont nécessaires par tranche de 100 000 habitants ; 4 hectares de terrain par tranche de 100 000 habitants devant de plus être trouvés tous les 10 ans afin de renouveler les installations existantes. Cela signifie par exemple que les besoins propres de la seule ville de Marseille (24 000 hectares de superficie et 850 000 habitants en 2007) en plateformes dédiées à la logistique urbaine sont de l'ordre de 100 à 120 hectares (Moiroux, 2009).

Dans le cadre d'une action fédérative française menée de 2001 à 2004 : *Espaces Logistiques Urbains (ELU)*, un groupe de recherche s'est intéressé à la coordination des méthodes expérimentales déjà concrètement employées dans certaines villes. Leur but était d'identifier les pratiques et leurs impacts, de repérer les actions potentiellement intéressantes, pour évaluer les effets d'une nouvelle organisation des livraisons et enlèvements en milieu urbain. Cette étude a abouti sur la caractérisation de catégories spécifiques d'équipements : les espaces logistiques urbains qui servent efficacement la logistique urbaine (Boudouin, 2006).

Les espaces logistiques urbains sont des équipements destinés à optimiser la livraison des marchandises en ville, sur les plans fonctionnel et environnemental, par la mise en œuvre de points de rupture de charge. Les intérêts de telles installations sont divers. Ils peuvent par exemple contribuer à une meilleure gestion fonctionnelle de la ville (dynamiser des zones denses, fluidifier la circulation...), à des économies de gestion (limiter les coûts d'infrastructures et de transport) mais aussi à une amélioration de l'impact environnemental de la logistique urbaine (améliorer l'image du centre-ville, minimiser le nombre de véhicules, les distances qu'ils parcourent et les émissions de polluants...).

Cinq catégories d'espaces logistiques urbains sont détaillées dans l'étude : les Zones Logistiques Urbaines, les Centres de Distribution Urbaine, les Points d'Accueil des Véhicules, les Points d'Accueil des Marchandises et les Boîtes Logistiques Urbaines. Ces catégories diffèrent selon leur mission première (niveau d'intervention sur la chaîne de la logistique urbaine), les zones géographiques qu'elles couvrent, les niveaux d'intervention (financier et juridique) de la collectivité pour leur mise en place, et les moyens (matériels et humains) utiles à leur fonctionnement.

Dans notre article, nous reprenons les résumés de Boudouin (2006) proposés dans Dufour et al. (2007) pour chacune de ces cinq catégories d'ELU.

**Les Zones Logistiques Urbaines (ZLU)** « Les ZLU ont pour finalité de localiser les professionnels à proximité de leurs clients afin de limiter les mouvements de véhicules. Le but est de faire revenir dans les agglomérations des professions qui en ont été chassées ces dernières décennies. Les gares ferrées, Marchés d'Intérêt National, hôtels logistiques, espaces spécialisés, sont des ZLU. Leur mise en place implique obligatoirement une intervention des pouvoirs publics. Leur mise en œuvre peut permettre d'abaisser de 25% le nombre de véhicules utilitaires en circulation et diminuer d'autant les nuisances. »

En France, un certain nombre d'études quant à l'intérêt de créer une ZLU ont vu le jour dans différentes villes (Paris, Marseille, Lyon, Strasbourg, Toulouse...) (Gerardin Conseil, 2007) ; certaines d'entre-elles aboutissant à des projets concrets. Marseille, par exemple, dispose d'une ZLU située en plein cœur de son centre-ville sur le site ferroviaire d'Arenc. Cette plateforme de 9 hectares est principalement dédiée aux activités de logistique urbaine.

**Les Centres de Distribution Urbaine (CDU)** « Les CDU<sup>4</sup> permettent de [mutualiser] les flux qui pénètrent ou sortent de la ville en les canalisant vers un site où sont groupées ou dégroupées les marchandises avant la distribution finale par un opérateur unique. Un opérateur nouveau [public ou privé] intervient donc dans la chaîne logistique, ce qui nécessite une nouvelle organisation impliquant une rupture de charge. La part d'envois pouvant être captée par un CDU se situe aux alentours de 15% du total. Ce concept est particulièrement adapté à la messagerie (le plus problématique pour le fonctionnement de la ville). »

Les CDU sont apparus pour beaucoup de collectivités comme étant un élément prépondérant à une meilleure gestion de la logistique urbaine. Il n'est ainsi pas surprenant d'observer que des CDU soient impliqués dans beaucoup d'études et projets à travers le monde (Interface Transport, 2004 ; Browne et al. 2005 ; Gerardin Conseil, 2007 ; Gonzales-Feliu et Morana, 2010).

**Les Points d'Accueil des Véhicules (PAV)** « Les PAV sont destinés à la livraison d'envois de petite taille, ils offrent aux véhicules utilitaires la possibilité de stationner en un lieu gardienné, garanti libre d'accès et sécurisé, d'où [le(s) chauffeur(s)-livreur(s) rejoindra(ont)] à pied (éventuellement avec l'aide de moyens de manutention) le lieu de destination. Un tel espace doit permettre le stationnement en simultané de 5 à 10 véhicules. Il peut traiter de 200 à 300 colis par jour. Il s'adresse aux envois de type express. Son coût est lié pour l'essentiel à la rémunération d'un ou deux agents. Un tel service réduit l'encombrement de la voirie et permet un gain pour les transporteurs se mesurant en temps gagné et en kilomètres parcourus. »

La présence de personnel dédié au PAV garantit que le site soit un lieu libre de tout usage et sécurise les véhicules et les marchandises transportées. Une fonction d'aide à la manutention peut aussi être envisagée pour ces personnels.

En France, la première implantation d'un PAV a été initiée dans le centre-ville de Bordeaux en 2003, en parallèle à la mise en place de la première ligne de tramway de l'agglomération (Schilde, 2007).

**Les Points d'Accueil des Marchandises (PAM)** « Les PAM permettent de concentrer les envois à destination ou en provenance d'une zone difficile d'accès. Ces interfaces se substituent au

---

<sup>4</sup> en anglais : City Distribution Center ou Urban Freight Consolidation Center

destinataire ou à l'expéditeur pour éviter le *dernier mètre*. Ce principe présente l'avantage de minimiser le nombre de véhicules-kilomètres nécessaires pour présenter plusieurs fois la marchandise en l'absence répétée du destinataire et de mieux gérer les tournées par une plus grande souplesse horaire et spatiale. Le rayon d'application est de 100 à 150 m pour les commerçants et artisans et beaucoup plus pour les particuliers, dispensés d'une *permanence* pour attente de livraison. Ces équipements sont de taille modeste (de 10 à 60 m<sup>2</sup>) et les volumes traités généralement inférieurs à 200 colis/jour. Ils peuvent être développés par des structures publiques ou privées et être dédiés à cette activité ou positionnés dans un établissement (commercial ou de service). Les avantages se retrouvent au niveau des temps de tournée et permettent des gains substantiels pour les transporteurs qui n'ont plus à se rendre chez le client. »

Un exemple important de réseaux de PAM est le réseau Kiala. Lancé en 2001 en Belgique et au Grand Duché de Luxembourg, Kiala s'est depuis déployé dans de nombreux pays d'Europe (France, Pays-Bas, Espagne). En 2010, l'entreprise compte 5 400 relais traitant ensemble jusqu'à 136 000 colis par jour. En France, le réseau compte 3 900 relais en 2010 et poursuit sa densification avec l'objectif annoncé d'atteindre 7 000 relais en 2011 (Kiala, 2010).

**Les Boîtes Logistiques Urbaines (BLU)** « Les BLU sont des interfaces qui permettent de relier le transporteur et le client sans que la présence d'une personne sur le lieu de transfert ne soit nécessaire, tels des sas, des casiers aménagés ou apportés, des automates... Ils peuvent être implantés sur des espaces privés ou publics. La procédure classique (réception du colis/reconnaissance de la livraison) est ici changée, ce qui implique une déconnexion des opérations de transport et d'administration de l'envoi. En dehors des sas, le rôle des BLU reste axé sur des envois inférieurs à 1 m<sup>3</sup>. Les structures publiques sont a priori peu impliquées dans le développement de ces outils, mais leur intérêt économique et environnemental justifie un encouragement de leur installation. Le principal intérêt réside dans la capacité à livrer en dehors des heures de pointe, ce qui permet de multiplier le nombre de points livrés durant un même laps de temps. »

La France dispose à l'heure actuelle d'un faible nombre de BLU. En 2010, les acteurs principaux sur ce marché français encore en phase de lancement sont La Poste (avec ses relais Cityssimo) et Consignity.

### 2.3 La logistique urbaine : une problématique d'une grande variété

Par définition, la logistique urbaine est une problématique très variée, tant par les différents objectifs qu'elle cherche à optimiser (économique, environnemental, sociétal) que par les acteurs variés et les nombreux niveaux de décision qu'elle tend à considérer. Selon Mac Kinnon (1999) ou Delaître (2008), les décisions prises par les entreprises pour gérer au mieux le transport de marchandises en ville se déclinent en quatre grands types de fonctions :

- fonctions *stratégiques* : elles concernent les décisions affectant le nombre de sites, les capacités des sites, des entrepôts et quais de chargement ;
- fonctions *commerciales* : elles affectent les décisions commerciales d'approvisionnement, de conceptualisation et de distribution. Ces décisions établissent un réseau qui lie les différentes entreprises et permet le transit de marchandises entre les partenaires ;
- fonctions de *planification* : elles s'intéressent aux décisions concernant le programme de production et de distribution ;

- fonctions de *transport* : elles relèvent des décisions liées aux moyens d'acheminement des marchandises comme l'utilisation d'une flotte de véhicules attitrée ou d'un opérateur de transport externe, le choix d'un itinéraire...

La logistique urbaine est aussi complexe car elle est constituée d'un très grand nombre de chaînes logistiques de taille et de fonctionnement qui varient en fonction des acteurs et des produits en transit.

Devant une problématique à tels enjeux et d'une aussi grande diversité, il apparaît alors clair que la recherche opérationnelle, qui *propose des modèles conceptuels pour analyser des situations complexes et permet aux décideurs de faire les choix les plus efficaces* (Billaut, 2006), peut s'avérer d'une très grande utilité. La recherche opérationnelle est en effet en mesure de développer des outils d'aide à la décision servant efficacement à la mise en place physique de solutions innovantes (notamment les Espaces Logistiques Urbains) pour une meilleure organisation de l'outil logistique urbain des grandes agglomérations.

Dans la section suivante, nous nous focalisons sur les problématiques qui engagent les acteurs de la logistique, et par extension de la logistique urbaine, sur du long terme. Dans le découpage classique en trois niveaux de décision de l'entreprise (stratégique, tactique et opérationnel) (Vollmann et al., 2007), ce choix revient à situer notre étude sur les problématiques organisationnelles impactant le plus haut niveau de décision : le niveau stratégique.

### 3. Planification stratégique en logistique

Deux problématiques génériques se dégagent lorsqu'on évoque la planification stratégique dans le domaine de la logistique : le problème de conception de réseau (*network design problem*) et le problème de localisation de sites (*facility location problem*). Ces deux problématiques complémentaires couvrent en effet le panel des principales décisions stratégiques utiles à la mise en place d'une organisation logistique optimisée. Ainsi, le *network design problem* s'intéresse d'un côté à définir la meilleure conception des réseaux de distribution alors que le *facility location problem* vise lui à optimiser la localisation des différentes infrastructures (comme, par exemple, les Espaces Logistiques Urbains pour les grandes agglomérations) de la chaîne logistique à optimiser. Du fait de leurs nombreuses applications pratiques, ces deux problématiques (et leurs variantes) ont fait l'objet de nombreux travaux en recherche opérationnelle.

Nous proposons ici de définir, dans un premier temps, la version originelle, et les principales variantes, de ces deux problèmes. Nous centrons ensuite notre discours sur les travaux traitant de leur application à la logistique urbaine.

#### 3.1 Problème de conception de réseau (*Network design problem*)

Conçu dans les années 1960 pour gérer des problématiques de conception de réseaux de télécommunication, le panel d'application des modèles de *network design problem* s'est depuis très nettement étoffé. Il est désormais commun d'utiliser de tels modèles dans la micro-informatique, les réseaux de transport (personne, énergie, eau...), la logistique, les systèmes de production-distribution...

Le *network design problem* vise à concevoir un réseau optimal sur lequel des entités, appelons-les produits, seront transportées entre différents points.

Dans le modèle générique : le *fixed cost network design problem* (Magnanti et Wong, 1984 ; Minoux, 1989 ; Crainic 2000), on considère un graphe  $G=(N,A)$ , avec  $N$  un ensemble de nœuds et  $A$  un ensemble d'arcs. On s'intéresse de plus à un ensemble de produits  $p \in P$  à transporter sur le réseau ; une quantité  $q_p$  de chaque produit transitant depuis un nœud origine  $o_p \in N$  vers un nœud destination  $d_p \in N$ . Le problème consiste alors à déterminer le sous-ensemble d'arcs de  $A$  qui assure le transit de l'ensemble des produits de  $P$  au moindre coût. Le coût d'une solution se caractérise par la somme des coûts *fixes* de sélection des arcs (chaque arc de  $A$  a un coût de sélection) et des coûts de transport, dits *variables* (chaque arc de  $A$  a un coût de transport selon le produit  $p \in P$  en transit).

La figure 1 illustre une instance d'un *fixed cost network design problem*. Dans cet exemple, on s'intéresse à un unique produit  $p_1$  et à un graphe  $G$  composé de 4 nœuds et 5 arcs. 7 unités de  $p_1$  doivent transiter depuis le nœud 1 vers le nœud 4. La solution optimale de cette instance consiste à faire circuler les 7 unités de  $p_1$  sur les arcs (1,2), (2,3) et (3,4). On obtient ainsi une solution de coût 133 correspondant à la somme des coûts fixes de sélection des arcs (20+5+10) ajoutée à la somme des coûts de transport (7×(2+2+10)).

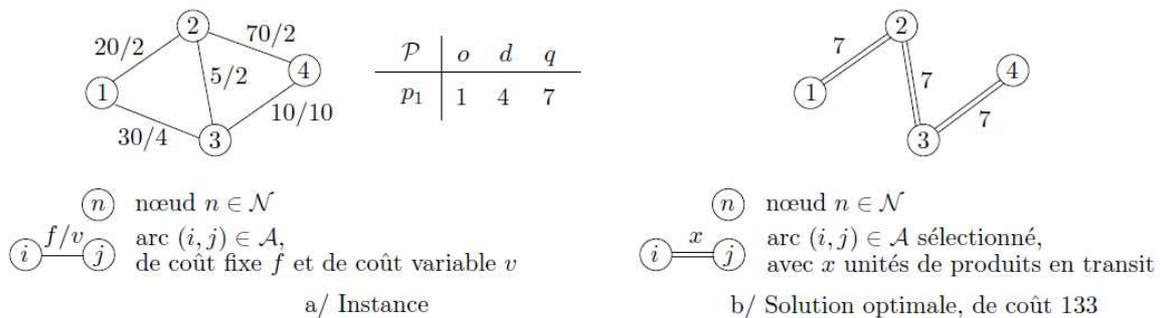


Figure 1 : exemple d'un *fixed cost network design problem*

L'annexe A.1 propose une formalisation sous forme d'un programme linéaire mixte du *fixed cost network design problem*.

Une multitude de variantes à ce modèle de base existent. Toutes exploitent ce modèle générique et y rattachent des contraintes additionnelles (plusieurs produits en transit, des capacités sur les arcs, des contraintes budgétaires, une distance maximale de transit d'un produit à respecter...) et/ou des fonctions-objectif différentes (non linéaire...). Nous renvoyons le lecteur à Magnanti et Wong (1984), Minoux (1989), Balakrishnan et al. (1997) et Thomadsen et Stidsen (2007), pour un état de l'art complet et les principales références à ces variantes.

D'un point de vue théorique, beaucoup de *network design problems* sont NP-difficiles (Crainic, 2000).

Un grand nombre de problématiques classiques de la recherche opérationnelle peuvent être formalisées sous la forme d'un *network design problem* (Wong, 1978 ; Magnanti et Wong, 1984). Parmi eux figurent par exemple le problème de plus court chemin, le problème de l'arbre de Steiner, le problème du voyageur de commerce...

Le *facility location problem* s'ajoute lui aussi à cette liste de problèmes formalisables sous la forme d'un *network design problem*. Dans la section suivante, nous nous intéressons de plus près à ce problème.

### 3.2 Problème de localisation de sites (*Facility location problem*)

Le *facility location problem* (Mirchandani et Francis, 1990 ; Daskin, 1995 ; Drezner et Hamacher, 2004 ; Klose et Drexl, 2005 ; Reville et Eiselt, 2005 ; Reville et al., 2008) fait référence à une classe de problèmes de localisation de sites dans un espace géographique prédéfini.

Sommairement, chaque variante du *facility location problem* considère en entrées deux ensembles  $J$  et  $I$ .  $J$  est un ensemble de nœuds représentant chacun une localisation possible pour l'implantation d'un dépôt ; un dépôt pouvant être une usine de fabrication ou une plateforme de distribution.  $I$  est un ensemble de nœuds symbolisant chacun un client ; un client  $i \in I$  étant caractérisé par un niveau de demande  $q_i$ . Selon les cas pratiques considérés,  $I$  et  $J$  peuvent être disjoints ou non-disjoints (voire égaux). Un des objectifs du problème consiste à déterminer un sous-ensemble de nœuds sur lesquels créer des dépôts. Chaque client est alors rattaché à un ou plusieurs dépôts qui le desservent.

Dans la version de base du problème, le *p-median problem* (Hakimi, 1964, 1965), on s'intéresse à localiser exactement  $p$  dépôts puis à rattacher chaque client à l'un d'eux. L'objectif du problème consiste à minimiser la somme totale des distances, pondérées par les demandes, des clients à leur dépôt. Le *p-median problem* a été prouvé NP-difficile par Kariv et Hakimi (1979).

La figure 2 décrit une instance de *p-median problem* impliquant 5 clients et 3 localisations possibles. Dans cet exemple, 2 dépôts doivent être localisés. La figure 2.b illustre une solution de cette instance. Deux localisations sont sélectionnées et chaque client est rattaché à l'une d'elles. Les clients ayant une demande respective égale à 100 et à 20 sont ainsi liés au même dépôt, alors que les clients dont la demande vaut respectivement 50, 15 et 10 sont connectés à l'autre localisation retenue.

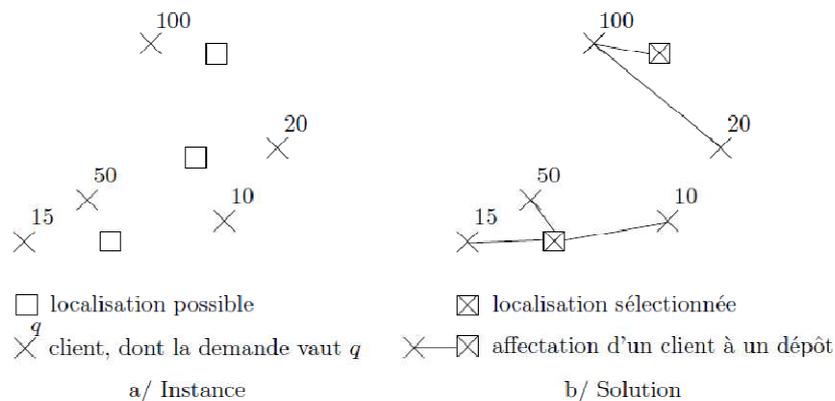


Figure 2 : exemple d'un *p-median problem* ( $p=2$ )

L'annexe A.2 décrit la formalisation sous forme de programme linéaire en nombres entiers du *p-median problem* proposée dans Reville et Swain (1970).

Le *Uncapacitated Facility Location Problem* (UFLP), aussi appelé *Simple Plant Location Problem*, est une variante du *p-median problem*. Dans le UFLP, le nombre de dépôts à ouvrir n'est plus une constante : il doit être décidé. Un coût fixe d'ouverture d'un dépôt en chaque nœud est alors donné en entrée du problème. La fonction objectif devient une somme décomposable en deux termes : la somme des coûts fixes d'ouverture des dépôts d'une part, et la somme totale des distances, pondérées par les demandes, des clients à leur dépôt d'autre part.

Le *Capacitated Facility Location Problem* (CFLP) est très similaire au UFLP. Seules des contraintes sur les capacités des dépôts sont ajoutées : chaque dépôt ne peut traiter qu'un volume limité de

demande. Ces contraintes additionnelles annulent alors l'optimalité de la mono-affectation des clients à un dépôt ; propriété à la fois valable pour le *p-median problem* et le UFLP. En effet, pour chacune de ces deux variantes du *facility location problem*, il est trivial de vérifier qu'il est optimal de rattacher les clients à un unique dépôt : le dépôt ouvert le plus proche (au sens des distances).

Les trois principales variantes du *facility location problem* proposées ci-dessus considèrent généralement des chaînes de distribution à un seul niveau, c'est-à-dire, les dépôts sont identiques et directement reliés au client. On parle alors de *single-stage facility location problem*. Lorsque la chaîne de distribution à considérer est plus complexe et nécessite le recours, par exemple, à des usines de fabrication qui desservent des dépôts de stockage d'où les clients sont approvisionnés, on s'intéresse à des problématiques avec des dépôts à différencier selon leur niveau dans la chaîne logistique. On parle alors de *multi-stage facility location problem*.

D'autres variantes du *facility location problem* existent. Leur formalisation est cependant toujours fortement liée aux modèles proposés ci-dessus.

### 3.3 Couplage *network design problem* et *facility location problem*

Le *network design problem* et le *facility location problem* sont deux problèmes très complémentaires dans la constitution de la chaîne logistique d'une entreprise. Le premier s'attache en effet à définir un réseau de distribution (éventuellement intermodal) robuste et rentable alors que le second vise à gérer de manière efficace les infrastructures de production et/ou stockage. Bon nombre de travaux attestent de l'intérêt des chercheurs pour la complémentarité évidente de ces deux problématiques.

Melo et al. (2009) présente un état de l'art très récent des problématiques intégrant *facility location problem* et *supply chain management* (problématique connexe au *network design problem*) ; les quelques 120 articles référencés étant parus entre 1995 et 2008. Dans cette étude, les problématiques sont catégorisées selon les données qu'elles considèrent (un ou plusieurs niveaux dans la chaîne logistique, un ou plusieurs types de produits, une ou plusieurs périodes de planification, des données déterministes ou stochastiques) et le type de décisions qu'elles tendent à prendre (capacité des dépôts, niveaux de stock, gestion de la production, gestion des modes de transport...). La liste des publications incombant à chaque catégorie est ensuite proposée au lecteur. Dans leur conclusion, les auteurs expriment, entre autre, le regret de ne pas voir plus d'articles scientifiques s'attaquant à des problèmes concrets. Ils pensent en effet que les problématiques étudiées portent trop souvent sur des organisations logistiques simplistes : un seul produit et un seul type de dépôts sont généralement pris en compte.

### 3.4 Travaux en logistique urbaine

Même si le nombre de travaux dans ce domaine reste encore faible, la planification stratégique de la logistique urbaine commence à être de plus en plus considérée par les scientifiques. Cet essor s'explique par les forts enjeux d'une meilleure gestion de la logistique urbaine qui se font de plus en plus ressentir, à la fois au niveau social et au niveau politique. De nombreux projets scientifiques dédiés, financés par les collectivités, voient donc le jour (COST, BESTUFS...) depuis quelques années maintenant.

Crainic et al. (2009b) propose un état de l'art complet des travaux de recherche opérationnelle appliqués à la logistique urbaine. On peut s'apercevoir que la plupart de ces travaux étudient la rentabilité de la consolidation des marchandises à travers des Centres de Distribution Urbaine (définis dans la section 2.2) (Taniguchi et al., 1999 ; Taniguchi et Van der Heijden, 2000 ; Taniguchi et

Thompson, 2002 ; Crainic et al., 2004 ; Taniguchi et Thompson, 2006 ; Crainic, 2008 ; Crainic et al., 2009b). Différents schémas de la chaîne logistique sont étudiés dans ces articles : *single-stage* ou *multi-stage* (par exemple, des plateformes de stockage de grande taille en dehors de la ville et des Centres de Distribution Urbaine de taille modérée à l'intérieur de la ville).

De nombreux travaux en logistique urbaine font également état de l'usage de nouvelles technologies dans le monde du transport (les *Intelligent Transport Systems*) (Taniguchi et al., 2001 ; Crainic et al. 2004, 2009a). Tous ces outils (GPRS, GPS, RFID...) de plus en plus perfectionnés permettent idéalement aux logisticiens d'obtenir une information fiable en temps réel. Dans un contexte urbain dense et congestionné, une telle qualité d'information est décisive. Cela fait ainsi de la logistique urbaine une logistique à part avec des organisations nouvelles à inventer.

Une problématique ressort tout particulièrement des travaux de la recherche opérationnelle appliquée à la logistique urbaine. Il s'agit du problème de tournées de véhicules à deux niveaux (*two-echelon vehicle routing problem*) (Perboli et al., 2008 ; Crainic et al., 2010). Dans ce problème, des systèmes de logistique urbaine à deux niveaux sont étudiés. Au premier niveau, des marchandises sont transportées par des véhicules de taille importante depuis un unique dépôt principal (généralement un Centre de Distribution Urbaine situé aux abords de l'agglomération considérée) vers un nombre fixé de dépôts de petite taille (des points de ravitaillement situés au cœur de la ville) où elles sont transférées à des véhicules urbains légers. Au second niveau, les véhicules légers effectuent des tournées pour déplacer les marchandises des points de ravitaillement vers les clients auxquels elles sont destinées.

## 4. Planification pour la logistique urbaine verte

### 4.1 Logistique verte

La norme X 50-600 de l'Association Française de Normalisation (AFNOR) définit la *logistique* comme étant *une fonction dont la finalité est la satisfaction des besoins exprimés ou latents, aux meilleures conditions économiques pour l'entreprise et pour un niveau de service déterminé. Les besoins sont de nature interne (approvisionnement de biens et de services pour assurer le fonctionnement de l'entreprise) ou externe (satisfaction des clients). La logistique fait appel à plusieurs métiers et savoir-faire qui concourent à la gestion et à la maîtrise des flux physiques et d'informations ainsi que des moyens.*

Dans un contexte économique capitaliste, l'objectif principal de la *logistique* revient alors à coordonner les activités de l'entreprise, tout au long de sa chaîne logistique (allant depuis les fournisseurs vers les clients), de manière à satisfaire la demande de ses clients au moindre coût. Jusqu'alors, la notion de coût était généralement traduite en termes financiers. La mentalité collective évoluant, cette considération purement monétaire tend aujourd'hui à changer : les coûts environnementaux de la logistique (impact sur le changement climatique, pollution atmosphérique et visuelle, bruit, accidentologie, production d'énergie, congestion...) sont devenus des facteurs décisionnels importants. On parle ainsi désormais de logistique verte (*green logistics*).

En accord avec cette évolution des mœurs, la recherche opérationnelle tente de définir de nouveaux modèles qui optimisent les processus impactant toute chaîne logistique au travers des trois volets (économie, environnement et société) de cette nouvelle conception de l'intérêt public qu'est le *développement durable* (Sbihi et Eglese, 2007).

Un frein notable à la mise en place de tels modèles porte sur l'évaluation des solutions logistiques. En effet, autant il est relativement aisé de quantifier des coûts financiers, autant il est complexe de lister et quantifier des coûts environnementaux et sociétaux. Des avancées aussi bien politiques (par exemple, dans le domaine du transport : Eurovignette 1 et 2 en France ou (Maibach et al., 2008) en Europe) que scientifiques (par exemple, dans le domaine du transport : Omrani et al., 2009 ; Sathaye et al., 2010) proposent des éléments méthodologiques pour quantifier ces coûts dits *externes*. Omrani et al. (2009) propose par exemple une approche basée sur la méthode *Analytic Hierarchy Process* pour l'évaluation multicritère de projets de transport comme les parcs relais, le covoiturage... Dans cet article, les auteurs considèrent le covoiturage comme cas d'étude pour valider leur méthodologie. Ils utilisent alors les critères de pollution atmosphérique (critère lui-même divisé en trois sous-critères : émission de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> et CO) et de bruit pour estimer l'impact environnemental du covoiturage.

Il semble néanmoins que de nombreux efforts doivent encore être effectués avant qu'un consensus quant à une méthodologie complète d'estimation du facteur développement durable ne soit atteint. Dans un rapport d'évaluation des projets en matière de distribution urbaine de marchandises en France (Gerardin Conseil, 2007), les auteurs terminent leur étude en formulant 10 propositions pour les projets futurs. La première est « d'harmoniser les méthodes de suivi économiques et environnementales » ; les auteurs insistent d'ailleurs sur le fait que « les principales difficultés rencontrées [pour une estimation juste de l'intérêt des projets] concernent l'évaluation environnementale ».

## 4.2 Planification stratégique et logistique verte

L'émergence de la considération du *développement durable* dans les articles scientifiques traitant de problématiques qui impactent la logistique des entreprises à un niveau stratégique se fait sentir depuis quelques années.

Dans Sbihi et Eglese (2007), les auteurs décrivent par exemple un certain nombre de nouvelles problématiques stratégiques qui surviennent lorsque les objectifs considérés ne sont plus purement économiques, mais impliquent aussi des aspects environnementaux et sociétaux. Sbihi et Eglese (2007) se base pour cela sur des problèmes bien connus tels que la logistique inverse (discipline qui consiste à gérer et à optimiser les flux provenant du consommateur en direction du fabricant ; ces flux pouvant éventuellement servir à recycler et/ou ré-usiner des marchandises déjà consommées), la gestion des déchets (et donc leur recyclage éventuel) ou encore des problèmes de tournées de véhicules où on s'attache à réduire les émissions de polluants. Srivastava (2007) propose pour sa part un état de l'art complet sur le *Green Supply Chain Management*. Harris et al. (2009) traite lui d'un *Multi-Objective Uncapacitated Facility Location Problem for Green Logistics*. Dans cet article, Harris et al. définissent deux coefficients  $W_T$  et  $W_F$  afin de prendre en compte l'aspect environnemental de leur problème. Dans la fonction objectif,  $W_T$  et  $W_F$  permettent ainsi de pondérer, respectivement, les coûts de transports et les coûts fixes de construction de dépôts. Les auteurs supposent ainsi que le coût environnemental d'une solution est linéairement liée à son coût économique, ce qui peut a priori s'avérer faux dans des cas concrets. Par exemple, à coût financier fixé, un tronçon de routes parcouru par un camion s'avèrera plus nocif du point de vue environnemental si le moteur du camion est thermique plutôt qu'électrique.

### 4.3 Logistique urbaine et logistique verte

Comme on l'a vu auparavant dans la section 2, la logistique urbaine considère, par définition, les flux de marchandises en ville sous des aspects économiques, mais aussi environnementaux et sociétaux. Comme le mentionne Crainic (2008), un des enjeux à l'étude de cette nouvelle problématique qu'est la logistique urbaine est en effet de réduire et contrôler le nombre, les dimensions et les caractéristiques des flottes de véhicules en mouvement à l'intérieur des villes, mais aussi d'améliorer l'efficacité des déplacements de ces véhicules et réduire le nombre de kilomètres effectués à vide.

Les concepts de la logistique urbaine coïncident ainsi parfaitement avec les principes du développement durable. Dès lors, il est inutile d'évoquer explicitement la logistique verte lorsqu'on étudie la logistique urbaine.

## 5. Conclusion

Nous avons, dans cet article, traité une thématique assez récente : la logistique urbaine. Cette problématique vise à définir de nouveaux schémas logistiques, respectueux de l'environnement, dédiés à la ville. Nous avons dans un premier temps défini les enjeux et intérêts de la logistique urbaine. Nous avons ensuite présenté des problèmes stratégiques de la logistique en général, et de la logistique urbaine en particulier. Nous avons finalement conclu sur les problématiques, traitant de logistique, qui considèrent le facteur *développement durable* comme un critère décisionnel important.

Au travers de nos recherches, nous avons pu voir que la logistique urbaine connaît à l'heure actuelle un réel engouement de la part des chercheurs. Ceci s'explique par les efforts concédés par bon nombre d'institutionnels qui ont bien compris qu'il était nécessaire de rapidement trouver des solutions innovantes pour mieux gérer le stockage et le transport de marchandises produites et/ou consommées dans ces milieux denses que sont les grandes villes.

Nous avons aussi pu constater qu'un grand frein au développement de solutions respectueuses de l'environnement dédiées à la logistique repose sur la difficulté à quantifier les impacts environnementaux et sociétaux. En effet, contrairement au coût financier où un consensus est facilement atteint, caractériser des critères environnementaux génériques est difficile. Aucune méthodologie ne fait encore référence en la matière. Chaque article à connotation *développement durable* pose alors ses propres critères, ce qui rend une comparaison entre études difficile.

## Bibliographie

Balakrishnan, A., Magnanti, T. L., and Mirchandani, P. (1997). Annotated Bibliographies in Combinatorial Optimization: Network Design, pages 311–334. Wiley, New York.

Billaut, J.-C. (2006). Recherche Opérationnelle et Génie Industriel. Dans Journée du Groupement Génie Industriel et de la ROADEF, Grenoble.

Boudouin, D. (2006). Guide méthodologique: Les espaces logistiques urbains. La Documentation Française, Paris.

Browne, M., Sweet, M., Woodburn, A., and Allen, J. (2005). Urban freight consolidation centres final report. Technical report, University of Westminster for the Department for Transport.

CBRE (2009). La logistique et les locaux d'activités en France 2009. Rapport technique, CB Richard Ellis.

- Organisation For Economic Co-operation And Development (OECD) (2003). *Delivering the Goods: 21st Century Challenges to Urban Goods Transport*. OECD.
- Crainic, T. G. (2000). Service network design in freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 122:272–288.
- Crainic, T. G. (2008). *City logistics*. Technical Report CIRRELT-2008-25, CIRRELT.
- Crainic, T. G., Gendreau, M., and Potvin, J.-Y. (2009a). Intelligent freight-transportation systems: Assessment and the contribution of operations research. *Transportation Research Part C*, 17:541–557.
- Crainic, T. G., Ricciardi, N., and Storchi, G. (2004). Advanced freight transportation systems for congested urban areas. *Transportation research. Part C, Emerging technologies*, 12(2):119–137.
- Crainic, T. G., Ricciardi, N., and Storchi, G. (2009b). Models for evaluating and planning city logistics systems. Technical Report CIRRELT-2009-11, CIRRELT.
- Crainic, T. G., Perboli, G., Mancini, S., and Tadei, R. (2010). Two-Echelon Vehicle Routing Problem : A satellite location analysis. *Procedia- Social and Behavioral Sciences*, 2(3):5944–5955.
- Dablanc, L. (2007). Goods transport in large european cities: Difficult to organize, difficult to modernize. *Transportation Research*, 41:280–285.
- Daskin, M. S. (1995). *Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications*. John Wiley and Sons, New York.
- Delaître, L. (2008). *Méthodologie pour optimiser le transport de marchandises en ville. Application aux villes moyennes et dans le cadre de l'agglomération de la Rochelle*. Sciences de gestion, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Drezner, Z. and Hamacher, H. W. (2004). *Facility location: applications and theory*. Springer, New York.
- Dufour, J.-G., Patier, D., et Routhier, J.-L. (2007). Du transport de marchandises en ville à la logistique urbaine. *Techniques de l'ingénieur. L'entreprise industrielle, AGL2(AG8210v2)*.
- Durand, B. (2010). E-logistique: le dernier kilomètre au premier plan. *Logistiques Magazine*, 246:42–50.
- Feys, R. (2010). *La logistique urbaine. Rapport technique, Ministère de l'Ecologie de l'Energie du Développement durable et de la Mer (MEEDM)*.
- Gérardin Conseil (2007). *Bilan critique des projets d'expérimentations en matière de distribution urbaine de marchandises initiés par les collectivités territoriales dans les agglomérations urbaines françaises. Rapport technique 02MT75, Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques du Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement*.
- Gonzalez-Feliu, J. and Morana, J. (2010). Are City Logistics Solutions Sustainable? The Cityporto case. *Trimestrale del Laboratorio Territorio Mobilità e Ambiente - TeMALab*, 3(2):55–64.
- Hakimi, S. L. (1964). Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *Operations Research*, 12(3):450–459.
- Hakimi, S. L. (1965). Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph theoretic problems. *Operations Research*, 13(3):462–475.
- Harris, I., Mumford, C., and Naim, M. (2009). The multi-objective uncapacitated facility location problem for green logistics. *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2009)*, pages 2732–2739.

- Interface Transport (2004). Espaces Logistiques Urbains de Monaco et La Rochelle. Rapport technique 0303C0070, Agence de l'Environnement de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME).
- Interface Transport, Gérardin Conseil, et LET (2009). Logistique et distribution urbaine. Rapport technique, PIPAME.
- Kariv, O. and Hakimi, S. L. (1979). An algorithmic approach to network location problems. part ii: The p-median. *SIAM Journal of Applied Mathematics*, 37(3):539–560.
- Kiala (2010). Un réseau européen de points de livraison en pleine croissance. <http://www.kiala.fr/fr/history> ; dernier accès : 08/10/2010.
- Klose, A. and Drexl, A. (2005). Facility location models for distribution system design. *European Journal of Operational Research*, 162(1):4–29.
- Magnanti, T. L. and Wong, R. T. (1984). Network design and transportation planning: Models and algorithms. *Transportation Science*, 18(1):1–55.
- Maibach, M., Schreyer, C., Sutter, D., Van Essen, H. P., Boon, B. H., Smokers, R., Schroten, A., Doll, C., Pawlowska, B., and Bak, M. (2008). Handbook on estimation of external costs in the transport sector.
- McKinnon, A. C. (1999). A logistical perspective on the fuel efficiency of road freight transport. In IEA workshop - Improving fuel efficiency in road freight transport: the role of information technologies, Paris.
- Ministère de l'Écologie de l'Énergie du Développement durable et de la Mer (MEEDM) et Agence de l'Environnement de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) (2004). Connaître le bilan environnemental des transports de marchandises dans son agglomération. [http://www.transports-marchandises-en-ville.org/rubrique.php3?id\\_rubrique=22](http://www.transports-marchandises-en-ville.org/rubrique.php3?id_rubrique=22) ; dernier accès : 08/10/2010.
- Melo, M. T., Nickel, S., and Saldanha-Da-Gama, F. (2009). Facility location and supply chain management - a review. *European Journal of Operational Research*, 196(2):401–412.
- Minoux, M. (1989). Network synthesis and optimum network design problems: models, solution methods and applications. *Networks*, 19(3):313–360.
- Mirchandani, P. B. and Francis, R. L. (1990). *Discrete Location Theory*. Wiley-Interscience.
- Moiroux, X. (2009). La logistique urbaine dans l'agglomération marseillaise. Rapport technique, Agence d'urbanisme de l'agglomération marseillaise.
- Omrani, H., Awasthi, A., Ion, L., and Trigano, P. (2009). A hybrid approach for evaluating environmental impacts for urban transportation mode sharing. *Journal of Decision System*, 18(2):185–201.
- Papaux, Y. (2006). La logistique urbaine : enjeux et étude du cas de Lausanne. Mémoire de licence, Université de Lausanne.
- Perboli, G., Tadei, R. and Vigo, D. (2008). The Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem : Models and Math-Based Heuristics. Technical Report CIRRELT-2008-55, CIRRELT.
- Revelle, C. S. and Eiselt, H. A. (2005). Location analysis: A synthesis and survey. *European Journal of Operational Research*, 165:1–19.
- Revelle, C. S., Eiselt, H. A., and Daskin, M. S. (2008). A bibliography for some fundamental problem categories in discrete location science. *European Journal of Operational Research*, 184(3):817–848.
- Revelle, C. S. and Swain, R. W. (1970). Central facilities location. *Geographical Analysis*, 2:30–42.
- Sathaye, N., Horvath, A., and Madanat, S. (2010). Unintended impacts of increased truck loads on pavement supply-chain emissions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(1):1–15.

- Sbihi, A. and Eglese, R. W. (2007). Combinatorial optimization and green logistics. *4OR: A Quarterly Journal of Operations Research*, 5:99–116.
- Schilde, P. (2007). Il transforme la ville. Bordeaux, tramway of life ! *Champ'éco*, 34:50–54.
- Srivastava, S. K. (2007). Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review. *International Journal of Management Reviews*, 9(1):53–80.
- Taniguchi, E., Noritake, M., Yamada, T., and Izumitani, T. (1999). Optimal size and location planning of public logistics terminals. *Transportation Research*, 35.
- Taniguchi, E. and Thompson, R. G. (2002). Modeling city logistics. *Transportation research record*, 1790:45–51.
- Taniguchi, E. and Thompson, R. G. (2006). *Recent Advances in City Logistics*. Emerald Group Publishing.
- Taniguchi, E., Thompson, R. G., Yamada, T., and Van Duin, J. (2001). *City Logistics: Network Modelling and Intelligent Transport Systems*. Pergamon.
- Taniguchi, E. and Van Der Heijden, R. E. C. M. (2000). An evaluation methodology for city logistics. *Transport Reviews*, 20(1):65–90.
- Thomadsen, T. and Stidsen, T. (2007). The generalized fixed-charge network design problem. *Computers & Operations Research*, 34:997 – 1007.
- Vollmann, T. E., Berry, W. L., and Whybark, D. C. (1997). *Manufacturing Planning and Control Systems*. McGraw-Hill, 4 edition.
- Wong, R. T. (1978). A survey of network design problems. Technical report, Massachusetts Institute of Technology.

## ANNEXES

### A.1 Formalisation sous forme de programme linéaire mixte du *fixed cost network design problem*

Dans cette première annexe, nous détaillons une formalisation sous forme de programme linéaire mixte du *fixed cost network design problem* (décrit en Section 3.1). Nous listons tout d'abord les données manipulées en entrée du modèle, ainsi que les variables de décision inhérentes à notre formalisation. Nous présentons ensuite le programme linéaire complet, avec sa fonction objectif et ses contraintes.

Les données nécessaires à notre modèle sont les suivantes:

- $\mathcal{G} = \{\mathcal{N}, \mathcal{A}\}$  : graphe avec  $\mathcal{N}$  un ensemble de nœuds et  $\mathcal{A}$  un ensemble d'arcs
- $\mathcal{P}$  : ensemble de produits
- $f_{ij}$  : coût de sélection de l'arc  $(i,j)$ ,  $\forall (i,j) \in \mathcal{A}$
- $c_{ij}^p$  : coût de transport d'une unité de  $p$  sur l'arc  $(i,j)$ ,  $\forall (i,j) \in \mathcal{A} \forall p \in \mathcal{P}$
- $q^p$  : demande de produit  $p$ ,  $\forall p \in \mathcal{P}$
- $d_i^p$  : demande de produit  $p$  au nœud  $i$ ,  $\forall i \in \mathcal{N} \forall p \in \mathcal{P}$ . On a :
 
$$d_i^p = \begin{cases} q^p & \text{si le produit } p \text{ a pour origine le nœud } i \\ -q^p & \text{si le produit } p \text{ a pour destination le nœud } i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$
- $M$  un nombre arbitrairement grand

Les deux groupes de variables de décision suivants sont manipulés dans le modèle décrit ici :

- $x_{ij}^p$  représente la quantité de  $p$  en transit sur l'arc  $(i,j)$ ,  $\forall (i,j) \in \mathcal{A} \forall p \in \mathcal{P}$
- $y_{ij} = 1$  si l'arc  $(i,j)$  est sélectionné, 0 sinon,  $\forall (i,j) \in \mathcal{A}$

Fort des données et des variables de décision détaillées ci-dessus, le *fixed cost network design problem* peut se formaliser par le programme linéaire [FCNDP] :

$$[FCNDP] \min \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} f_{ij} \cdot y_{ij} + \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} \sum_{p \in \mathcal{P}} c_{ij}^p \cdot x_{ij}^p \quad (1)$$

$$\forall i \in \mathcal{N} \quad \forall p \in \mathcal{P} \quad \sum_{j \in \mathcal{N}} x_{ij}^p - \sum_{j \in \mathcal{N}} x_{ji}^p = d_i^p \quad (2)$$

$$\forall (i,j) \in \mathcal{A} \quad \sum_{p \in \mathcal{P}} x_{ij}^p \leq M \cdot y_{ij} \quad (3)$$

$$\forall (i,j) \in \mathcal{A} \quad \forall p \in \mathcal{P} \quad x_{ij}^p \geq 0 \quad (4)$$

$$\forall (i,j) \in \mathcal{A} \quad y_{ij} \in \{0,1\} \quad (5)$$

La fonction objectif (1) de [FCNDP] mesure le coût total du système. Ce dernier est déterminé par la somme des coûts *fixes* de sélection des arcs et des coûts *variables* de transport. (2) exprime les traditionnelles contraintes de la *loi de conservation de flot* et assure que la demande de chaque client est satisfaite. On s'assure de plus que les unités de produit ne transitent que sur des arcs sélectionnés (3). (4) et (5) définissent enfin les domaines de définition des variables de décision.

## A.2 Formalisation sous forme de programme linéaire en nombres entiers du $p$ -median problem

Dans cette seconde annexe, nous décrivons la formalisation sous forme de programme linéaire en nombres entiers du  $p$ -median problem (décrit en Section 3.2) proposée dans Revelle et Swain (1970). Dans un premier temps, nous détaillons les données et les variables de décision du modèle. Le programme linéaire complet est ensuite exposé.

Les données nécessaires au modèle sont les suivantes :

- $\mathcal{I}$  : ensemble de clients
- $\mathcal{J}$  : ensemble de localisations admissibles pour des dépôts
- $p$  : nombre de localisations à sélectionner
- $q_i$  : demande du client  $i$ ,  $\forall i \in \mathcal{I}$
- $d_{ij}$  : distance entre le client  $i$  et la localisation  $j$ ,  $\forall i \in \mathcal{I} \forall j \in \mathcal{J}$

Les deux groupes de variables de décision suivants interagissent dans le modèle :

- $x_{ij} = 1$  si le client  $i$  est affecté à la localisation  $j$ , 0 sinon,  $\forall i \in \mathcal{I} \forall j \in \mathcal{J}$
- $y_j = 1$  si la localisation  $j$  est sélectionnée, 0 sinon,  $\forall j \in \mathcal{J}$

Fort des données et des variables de décision présentées auparavant, Revelle et Swain (1970) propose la formalisation [PMP] suivante. [PMP] est un programme linéaire en nombres entiers modélisant le  $p$ -median problem.

$$[PMP] \min \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j \in \mathcal{J}} q_i \cdot d_{ij} \cdot x_{ij} \quad (6)$$

$$\forall i \in \mathcal{I} \quad \sum_{j \in \mathcal{J}} x_{ij} = 1 \quad (7)$$

$$\forall i \in \mathcal{I} \quad \forall j \in \mathcal{J} \quad x_{ij} \leq y_j \quad (8)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} y_j = p \quad (9)$$

$$\forall i \in \mathcal{I} \quad \forall j \in \mathcal{J} \quad x_{ij} \in \{0,1\} \quad (10)$$

$$\forall j \in \mathcal{J} \quad y_j \in \{0,1\} \quad (11)$$

[PMP] vise à réduire les coûts, pondérés par les demandes, d'affectation des clients aux localisations sélectionnées (6). Chaque client est rattaché à une unique localisation (7) et la localisation concernée doit être sélectionnée (8). (9) assure pour sa part qu'exactly  $p$  localisations sont sélectionnées. (10) et (11) définissent enfin les domaines de définition des variables de décision.

La formalisation du *Uncapacitated Facility Location Problem* (et par extension du *Capacitated Facility Location Problem*) découle de [PMP]. La modélisation du *UFLP* est obtenue en ôtant de [PMP] les contraintes (9) et en ajoutant un terme tenant compte des coûts fixes à la fonction objectif (6).

## CONCEPTION D'UN RESEAU DE DISTRIBUTION EN MILIEU URBAIN : FORMULATION ET HYPOTHESES DE MODELISATION

Ce document décrit les éléments pris en compte dans le modèle développé et les hypothèses sous-jacentes. La modélisation s'appuie sur trois éléments principaux :

- une zone urbaine ou périurbaine découpée en secteurs auxquels sont associées des positions à servir,
- des terrains disponibles pour la construction d'une plateforme logistique,
- des types de véhicules pouvant être utilisés pour la distribution.

Des contraintes et critères de performances ont été introduits afin de décrire au mieux les interactions possibles entre ces éléments et les objectifs susceptibles d'être poursuivis par un utilisateur de modèle.

Nous précisons ci-dessous :

- quels types d'utilisateurs ont été ciblés dans la conception du modèle ;
- quels types de données sont demandés à l'utilisateur et exploités dans le calcul ;
- comment sont utilisées ces données et quelles hypothèses de modélisation ont été effectuées.

Rappelons enfin que la modélisation se positionne à un niveau de décision stratégique : conception du réseau de distribution. Il ne s'agit donc pas de modéliser finement le fonctionnement opérationnel de la distribution, ni les flux des véhicules utilisés pour le transport de marchandises. Par contre, bien que l'échelle utilisée dans la description du modèle soit celle de la ville, le modèle peut a priori s'adapter à des échelles différentes (échelle du quartier par exemple, ou échelle d'une région).

## 1. L'utilisateur du modèle

Le modèle a vocation à être utilisé par deux types d'utilisateurs bien distincts :

- des collectivités locales (municipalité, agence d'urbanisme...), désirant avoir une vision globale sur l'attractivité des terrains susceptibles d'être disponibles pour la logistique urbaine ; l'objectif de l'outil d'aide à la décision est alors de mettre en évidence les terrains les plus attractifs (parmi un ensemble de terrains candidats) ; cette catégorie d'utilisateurs peut être étendue aux aménageurs logistique ;
- des messagers, désirant soit faire évoluer leur organisation logistique, soit investir de nouveaux territoires ; l'objectif est alors de proposer un schéma de distribution complet, allant du choix du terrain au dimensionnement de la flotte de véhicules et à de possibles organisations des tournées.

### 1.1 Collectivité locales, aménageurs logistiques

Dans le premier cas, la demande de la ville est considérée de manière globale et complète. Les messagers découpant traditionnellement la ville en secteurs (s'apparentant typiquement à des arrondissements), chaque secteur se voit associé un nombre important de positions à servir, équivalent à l'ensemble des positions servies par l'ensemble des messagers. La distribution est alors modélisée de la manière suivante : des véhicules partent d'une ou plusieurs plateformes, atteignent un secteur, servent un nombre de positions restreint par la capacité et l'autonomie du véhicule, puis reviennent à leur plateforme d'origine.

A noter que dans ce cadre les véhicules ne sont pas autorisés à faire des tournées impliquant plusieurs secteurs. L'hypothèse sous-jacente à cette dernière remarque est que l'impact de la mise en place de telles tournées serait marginal sur le choix des plateformes de distribution, au vu de l'importance des flux.

Une deuxième hypothèse plus lourde provient de la supposée maîtrise des flux par une entité centralisée (les collectivités locales ici). En particulier, chaque plateforme sera naturellement amenée à servir les secteurs qui lui sont proches et à laisser le soin de servir les secteurs plus éloignés à d'autres plateformes mieux positionnées. En pratique, chaque messenger, positionné généralement dans une plateforme unique, servira toute la ville à partir de sa plateforme, induisant ainsi une distribution des flux très différente. En d'autres termes le modèle proposé peut être vu comme une distribution mutualisée sur la ville. De nouveau, l'hypothèse est faite que ceci ne perturbe pas les résultats affichés en termes d'attractivité des plateformes.

### 1.2 Entreprises de messagerie

Concernant le deuxième cas, utilisation de l'outil par un messenger, le nombre de positions à servir sur chaque secteur sera naturellement plus réduit. Il est alors possible de faire l'hypothèse, vérifiée en pratique, que chaque secteur est servi par un unique véhicule. Selon l'importance du messenger, certains secteurs peuvent même avoir une demande très limitée. Il peut alors être essentiel de proposer une organisation dans laquelle les véhicules ont la possibilité de faire des tournées couvrant plusieurs secteurs.

La distribution est alors modélisée de la manière suivante : des véhicules partent d'une ou plusieurs plateformes, atteignent un secteur, servent l'ensemble du secteur, enchaînent avec un ou plusieurs

autres secteurs (en respectant des contraintes liées à la capacité et l'autonomie du véhicule), puis reviennent à leur plateforme d'origine.

### 1.3 Modélisation générique des secteurs

Afin de gérer ces deux types de finalités bien distinctes, deux types de secteurs ont été introduits dans le modèle :

- des secteurs appelés secteurs multi-véhicules tels que : plusieurs véhicules sont autorisés à servir (partiellement) le secteur ; ces véhicules n'ont pas la possibilité de servir un autre secteur ;
- des secteurs appelés secteurs mono-véhicules tels que : au plus un véhicule est utilisé pour servir (entièrement) le secteur ; ce véhicule peut combiner sa tournée avec un ou plusieurs autres secteurs.

Pour éviter de se restreindre à des situations trop rigides, chaque instance (cas d'étude) peut être définie en intégrant les deux types de secteurs. La seule limite est de définir a priori à quelle catégorie appartient le secteur.

Ainsi, par exemple, des collectivités peuvent décider de décrire de manière très désagrégée une partie de la ville (e.g., centre historique) en introduisant de nombreux secteurs mono-véhicules de très petite taille (suffisamment petite pour rendre possible la couverture du secteur par un véhicule). Tester des scénarios d'interdiction de certains secteurs très limités à certain types de véhicules sera alors possible (par exemple).

De même un messenger pourra introduire dans ses modèles des secteurs multi-véhicules pour prendre en compte, par exemple, des zones périurbaines ou des villes secondaires. Il pourra alors définir ces zones, dont il veut tenir compte car desservies à partir des mêmes plateformes par exemple, sans pour autant avoir besoin de les modéliser de manière très fine.

## 2. Définition des données

### 2.1 Préambule

L'horizon de temps considéré par l'outil est défini par un paramètre au lancement de l'optimisation, en nombre de jours d'exploitation. Typiquement le paramètre peut être fixé à 10 ans (environ 3000 jours d'exploitation), ce qui correspond à la durée de vie moyenne d'une plateforme. Tous les coûts et indicateurs de performance définis ci-dessous doivent être compris comme étant dimensionnés par rapport à cette durée.

### 2.2 Données associés aux secteurs

Les secteurs sont caractérisés à l'aide des données suivantes :

- **Nom**
- **Type (mono-véhicule ou multi-véhicules)**
- **Demande (en nombre de positions)**
- **Longueur de la tournée à l'intérieur du secteur (en km)**
- **Congestion (A, B, C, D, E)**

Le **nom** permet d'identifier le secteur.

Le **type** spécifie s'il s'agit d'un secteur mono-véhicule ou multi-véhicules (voir ci-dessus).

La **demande** est exprimée sous la forme d'un nombre de positions (estimé en moyenne) à couvrir. Cette unité a été choisie car représentative de la charge de travail dans le secteur.

La **longueur** de la tournée indique la distance moyenne à parcourir à l'intérieur du secteur pour couvrir l'ensemble des positions.

L'indicateur de **congestion** modélise la difficulté de circulation dans le secteur. Combiné à un indicateur volumétrique du véhicule, il permet de pénaliser l'usage de gros véhicules dans les secteurs les plus difficiles. Pour l'indicateur de congestion, une évaluation qualitative est demandée à l'utilisateur, avec une échelle allant de A (faible niveau de congestion) à E (fort niveau de congestion). L'utilisation quantitative précise de cet indicateur est détaillée dans la section sur la définition des critères d'optimisation.

### 2.3 Donnée associées aux terrains disponibles (pour y construire une plateforme logistique)

Les terrains sont caractérisés à l'aide des données suivantes :

- **Nom**
- **Superficie actuelle (en nombre de quais)**
- **Superficie maximale (en nombre de quais)**
- **Nombre de positions par quai**
- **Coût fixe (en euros)**
- **Coût variable (en euros/quai)**
- **Acceptabilité (A, B, C, D, E)**
- **Pollution (A, B, C, D, E)**

Le **nom** permet d'identifier le site.

L'unité choisie pour évaluer la capacité d'une plateforme est le nombre de quais. La **superficie actuelle** indique le nombre de quais actuellement ouverts sur le site. La **superficie maximale** indique le nombre maximal de quais envisageable. Un indicateur numérique, **nombre de positions par quai**, permet de faire le lien entre le nombre de quais et le nombre de positions pouvant être servies quotidiennement à partir de la plateforme :

$$\text{nombre de positions servies} \leq \text{nombre de quais} \times \text{nombre de positions par quai}$$

(rappelons que la demande des secteurs est modélisée sous forme d'un nombre de positions à servir)

Pour ce qui concerne la superficie des terrains, l'utilisateur a donc à sa charge de faire le lien entre la surface disponible en m<sup>2</sup> et le nombre maximal de quais envisageables.

Du point de vue économique, le coût d'un terrain est modélisé sous la forme d'un **coût fixe**, indépendant du nombre de quais, et d'un **coût variable** proportionnel au nombre de quais ouverts :

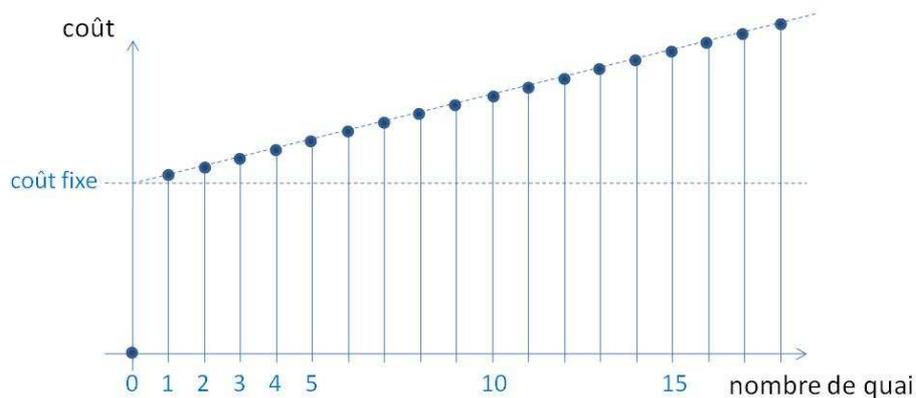


Figure 3: coût des plateformes

Ainsi, l'utilisateur pourra intégrer des catégories de coûts indépendantes du nombre de quais construits (coûts d'accès, coût de construction de bureaux...) et des coûts directement proportionnels à ce nombre (foncier, coûts d'exploitation...).

Lorsque la plateforme existe initialement (*Superficie actuelle* > 0), précisons que le coût fixe est automatiquement pris en compte ; s'il souhaite supprimer ce coût de l'évaluation des solutions, l'utilisateur a la possibilité de le fixer à 0. Par contre, les coûts variables ne sont comptabilisés que pour les quais additionnels : le coût des quais actuels doit être intégré dans le coût fixe.

Deux indicateurs qualitatifs sont introduits. L'indicateur **d'acceptabilité** modélise le niveau d'acceptabilité par la collectivité d'une plateforme logistique sur le terrain (facilité d'accès pour les flux amont, zone à bassin d'emploi prioritaire, zone résidentielle...); l'échelle utilisée va de A (site très bien positionné) à E (position très défavorable). L'indicateur de **pollution** donne la possibilité à l'utilisateur de prévoir ou de considérer des sites construits selon des normes et objectifs environnementaux plus ou moins importants (utilisation de cellules photovoltaïques, embranchement amont ferré...); de nouveau est utilisée une échelle de A (plateforme peu polluante) à E (plateforme très polluante). A noter que l'outil ne décide pas du type de plateforme pouvant être mise en place sur un site : c'est à l'utilisateur de faire ce choix et de définir les coûts fixes et variables en conséquence ; pour envisager plusieurs types de technologies pour des plateformes, il est donc nécessaire de mettre à jour les données et de répéter les calculs (scénarios). L'utilisation quantitative précise de ces deux indicateurs est détaillée dans la section sur la définition des critères d'optimisation.

## 2.4 Données associées aux types de véhicules

Les types de véhicules sont caractérisés à l'aide des données suivantes :

- **Nom**
- **Capacité (en nombre de positions)**
- **Autonomie en distance (en km)**
- **Autonomie temps (en minutes)**
- **Autonomie organisationnelle (en minutes)**
- **Coût fixe (en euros)**
- **Coût fonctionnement (en euro/km)**

- **Emission de polluants (en g/km)**
- **Congestion (A, B, C, D, E)**
- **Acceptabilité (A, B, C, D, E)**

Le **nom** permet d'identifier le type de véhicule.

La **capacité** indique le nombre maximal de positions quotidiennes pouvant être servies par les véhicules de ce type (rappelons que la demande des secteurs est modélisée sous forme d'un nombre de positions à servir). Connaissant le volume moyen des marchandises transportées (colis, palettes) et le nombre moyen de clients servis par position, l'utilisateur peut lier le volume du véhicule et le nombre de positions pouvant être servies. Notons qu'il a été admis que la dimension limitante pour un véhicule est le volume plutôt que le poids ; l'unité retenue (nombre de positions) permettrait cependant de tenir également compte du poids si nécessaire.

Trois mesures d'autonomie sont définies pour chaque type de véhicule : les deux premières, **autonomie en distance** et **autonomie en temps** correspondent à des limitations techniques ; elles sont sans usage pour des véhicules thermiques (des valeurs suffisamment élevées doivent alors être indiquées par l'utilisateur) mais prennent leur sens pour des véhicules électriques par exemple ; la troisième mesure d'autonomie, **autonomie organisationnelle**, concerne l'organisation de la distribution : elle indique la durée maximale consacrée aux tournées dans le planning.

L'utilisation d'un véhicule implique deux types de coûts : **coût fixe** (lié à l'achat, à l'assurance...), **coût de fonctionnement** pour chaque kilomètre parcouru. Chaque kilomètre parcouru induit également des émissions polluantes, caractérisées par un unique indicateur **émission de polluants**. Selon ses priorités, le choix du type d'émissions polluantes est laissé à la liberté de l'utilisateur (lorsqu'il définit cette valeur) ; le résultat étant simplement proportionnel au nombre de kilomètres parcourus, l'utilisateur peut s'il le souhaite décomposer dans un deuxième temps la pollution par type de particules. Précisons malgré tout que des simplifications assez grossières sont faites ici puisqu'il n'est pas tenu compte du nombre d'arrêts / démarrage ou de la vitesse du véhicule par exemple. Ceci pourra être considéré dans une version ultérieure de l'outil.

Enfin, de nouveau, deux indicateurs qualitatifs sont introduits. L'indicateur de **congestion** caractérise le niveau de perturbation pouvant être attendu du véhicule sur l'écoulement du trafic (notamment lorsque ce véhicule est à l'arrêt). Cet indicateur est directement lié à la surface du véhicule et est à mettre en relation avec l'indicateur de congestion d'un secteur, comme indiqué précédemment (voir données associées aux secteurs). Le deuxième indicateur concerne l'**acceptabilité** par les riverains du type de véhicule. Ainsi, la circulation de petits véhicules électriques sera par exemple vécue de manière plus positive par les riverains que celle de gros camions thermiques.

Dans les deux cas, l'échelle utilisée va de A à E, A étant l'évaluation la plus positive et E la plus négative. L'utilisation quantitative précise de ces indicateurs est détaillée dans la section sur la définition des critères d'optimisation.

### 3. Modélisation et données additionnelles de transport

Comme indiqué précédemment, la modélisation de la distribution dépend du type de secteur desservis.

### 3.1 Secteur multi-véhicules

Pour les secteurs multi-véhicules, les véhicules font un trajet direct depuis la plateforme, servent le secteur (partiellement), puis retournent à leur plateforme d'origine. L'évaluation de l'impact des tournées et du respect de l'autonomie des véhicules se base sur la distance parcourue et la durée de chacune des trois portions du trajet (approche initiale, service du secteur, retour). Les données suivantes sont nécessaires :

- longueur de la tournée à l'intérieur du secteur (voir section sur les Secteurs),
- distances entre les plateformes et les secteurs,
- durées d'approche entre les plateformes et les secteurs par type de véhicule,
- temps de service des secteurs par type de véhicule.

Des précisions sur ces données sont livrées dans les sous-sections suivantes.

Lorsqu'un secteur est servi partiellement, les distance et durée reconnues pour le service sont définies de manière proportionnelle au nombre de positions servies :

$$\text{distance} = \text{longueur du secteur} \times \text{nombre de positions servies} / \text{nombre de positions du secteur}$$

$$\text{durée} = \text{durée de service du secteur} \times \text{nombre de positions servies} / \text{nombre de positions du secteur}$$

La distance (resp. durée) de la tournée est alors la somme de la distance (resp. durée) d'approche, la distance (resp. durée) de service et la distance (resp. durée) de retour à la plateforme.

### 3.2 Secteurs mono-véhicules

Pour les secteurs mono-véhicules, les véhicules partent d'une plateforme, parcourent une succession de secteurs, qu'ils desservent entièrement, puis retournent à leur plateforme de départ. Afin d'alléger la modélisation, les distances entre secteurs ne sont pas considérées. A la place, nous introduisons une matrice de compatibilité entre secteurs (de type mono-véhicules) indiquant si deux secteurs sont autorisés à appartenir à une même tournée.

La distance (resp. durée) de la tournée est alors la somme de la distance (resp. durée) d'approche, la somme des distances (resp. durées) de service de chacun des secteurs visités et la distance (resp. durée) de retour à la plateforme.

Les distances (resp. durées) d'approche et de retour considérées sont celles reliant la plateforme au secteur le plus proche parmi ceux visités dans la tournée. Bien que ce secteur ne puisse pas être à la fois le premier et dernier secteur de la tournée, cette simplification a des conséquences limitées du fait de la nécessaire compatibilité (et donc proximité) des secteurs.

Précisons enfin que la séquence dans laquelle sont visités les secteurs servis par une tournée n'est pas modélisée. L'hypothèse est ainsi faite que, du fait de la compatibilité des secteurs, des transitions possibles entre ces secteurs existent à distance / durée négligeables.

### 3.3 Distances plateformes – secteurs

Pour chaque couple plateforme – secteur :

- **Distance (en km)**

La **distance** indique le nombre de kilomètres à parcourir pour relier la première position à servir dans un secteur à partir d'une plateforme. La première position servie n'étant pas connue (rappelons que la finalité de l'outil n'est pas opérationnelle mais stratégique), cette distance est forcément imprécise. Malgré tout la taille des secteurs est suffisamment limitée pour que l'influence de l'imprécision puisse être considérée comme négligeable. Réciproquement, ces données indiquent le nombre de kilomètre à parcourir une fois le service du secteur finalisé pour rejoindre la plateforme.

Pour évaluer la distance entre une plateforme et un secteur, l'utilisateur peut par exemple évaluer la distance entre la plateforme et le point naturel d'entrée dans le secteur à partir de cette plateforme.

### 3.4 Durées d'approche plateformes – secteurs

Pour chaque couple plateforme – secteur et chaque type de véhicules

- **Durée d'approche (en minutes)**

La **durée d'approche** indique le temps nécessaire pour relier la première position à servir dans un secteur à partir d'une plateforme (et réciproquement pour le retour). Comme précédemment, le point de démarrage / fin de la tournée interne au secteur peut être approximé.

Afin de tenir compte des caractéristiques des véhicules, ce temps de trajet est défini pour chaque type de véhicules. Bien qu'influençant fortement la durée du trajet, l'heure n'est pas gérée de manière explicite. L'utilisateur doit donc évaluer, en fonction de l'heure de démarrage et de fin des tournées en moyenne, le temps passé dans l'approche initiale et le retour vers la plateforme.

Pour ne pas alourdir le modèle, ces deux types d'information (aller et retour), bien que distinctes en pratique, sont agrégés. L'utilisateur devra donc renseigner la moyenne entre le temps moyen mis pour l'approche et le temps moyen mis pour le retour.

Rappelons enfin que ces informations ne sont utilisées que pour s'assurer du respect des contraintes d'autonomie des véhicules (contraintes techniques et organisationnelles). Il s'agit donc uniquement de voir si l'on accepte que certains types de véhicules aillent vers certains secteurs ou si ces secteurs sont considérés comme trop éloignés (risque de vider la batterie électrique, risque de retard important...).

### 3.5 Temps de service des secteurs

Pour chaque secteur et chaque type de véhicules

- **Temps de service (en minutes)**

Le **temps de service** indique le temps nécessaire au service de l'ensemble des positions de la zone avec un type de véhicule donné. Encore une fois, ce temps est défini par type de véhicules, afin de refléter les différences de circulation et de parking que peuvent rencontrer les véhicules, mais ne tient pas compte de l'horaire du service. Pour les secteurs multi-véhicules, la fenêtre de temps du service est suffisamment large pour pouvoir raisonnablement approximer ce temps. Pour les secteurs mono-véhicules, le temps de service est beaucoup plus faible et sera donc très variable selon l'horaire effectif du service. De plus l'heure exact du service n'est pas connue car la séquence de secteurs visités n'est pas explicitement modélisée (voir ci-dessus). L'utilisateur devra donc définir une durée de service moyenne, qui ne reflètera qu'imparfaitement la durée réelle du service.

Malgré tout, rappelons de nouveau que ces informations ne sont utilisées que pour s'assurer du respect des contraintes d'autonomie des véhicules et qu'il s'agit de voir si l'on accepte que certains types de véhicules aillent vers certains secteurs.

### 3.6 Compatibilité entre secteurs (mono-véhicules)

Pour chaque couple de secteurs mono-véhicules

- **Compatibilité (0,1)**

Deux secteurs mono-véhicules sont en **compatibilité** lorsqu'il est considéré comme acceptable qu'une tournée se charge conjointement des services de ces deux secteurs.

Il est important pour l'utilisateur de ne pas définir comme compatibles des secteurs trop éloignés car le temps et la distance de trajets entre ces secteurs sont négligés dans l'évaluation des tournées. De plus, seul le secteur le plus proche est considéré pour l'approche et le retour vers la plateforme. Typiquement l'utilisateur est donc incité à définir comme compatibles des secteurs adjacents ou proches. L'hypothèse sous-jacente est qu'en pratique prévoir des tournées visitant des secteurs éloignés est contre-productif.

Précisons que pour qu'une tournée visite un ensemble de trois ou plus secteurs, tous les secteurs doivent être compatibles deux à deux. Ainsi, trop restreindre la compatibilité, uniquement aux secteurs adjacents par exemple, est dangereux car cela empêcherait de visiter dans une même tournée, un secteur A, un secteur B adjacent à A et un secteur C adjacent à B mais non adjacent à A par exemple.

### 3.7 Interdiction secteurs – véhicules

Pour chaque secteur et chaque type de véhicules

- **Interdiction (0,1)**

Une **interdiction** est apposée à un type de véhicules pour un secteur lorsque la circulation de ce type de véhicules dans ce secteur est interdite.

La possibilité de limiter les interdictions à certaines plages horaires n'est pas prise en compte.

## 4. Critères d'optimisation

Au cours des descriptions des hypothèses de modélisation ci-dessus, 9 critères ont été introduits :

- 4 critères économiques : minimisation des coûts fixes et des coûts variables pour les plateformes construites et pour les véhicules utilisés ;
- 1 critère quantitatif environnemental : minimisation des émissions de polluants des véhicules utilisés ;
- 2 critères qualitatifs environnementaux : minimisation de la pollution induite par les plateformes, minimisation de la congestion provoquée par les véhicules utilisés.
- 2 critères qualitatifs sociétaux : maximisation de l'acceptabilité des terrains sélectionnés pour les plateformes et des véhicules utilisés.

Les critères sont agrégés sous forme de somme pondérée. A chaque type de critère, économique, environnemental ou sociétal est associé un poids (ci-dessous notés coefEco, coefEnv, coefSoc, respectivement), défini sur une échelle de 0 à 100 lors du lancement de l'optimisation.

Ainsi, les 4 critères économiques sont sommés et multipliés par ce facteur :

$$\text{évaluation économique} = \text{coefEco} \times (\text{coûts fixes plateformes} + \text{coûts variables plateformes} + \text{coût fixes véhicules} + \text{coûts variable véhicules})$$

Les critères qualitatifs sont dans un premier temps traduits de manière quantitative. A chaque type de critère qualitatif, pollution des plateformes, acceptabilité des plateformes, acceptabilité des véhicules, congestion induite par les véhicules, est associé un pas. Les valeurs associées aux notes de A à E sont alors :

$$A = 0, B = \text{pas}, C = 2 \times \text{pas}, D = 3 \times \text{pas}, E = 4 \times \text{pas}$$

Des valeurs par défauts sont définies pour les pas (0.2 pour chaque type de pas), mais ces valeurs peuvent être modifiées par l'utilisateur.

Pour les critères concernant les plateformes (pollution des plateformes, acceptabilité des plateformes), une note finale par plateforme est alors obtenue en multipliant la traduction numérique de la note qualitative par le nombre de quais. La note complète fait la somme des notes par plateformes.

$$\text{note pollution / acceptabilité plateforme} = \sum_{\text{plateformes}} \text{traduction quantitative note} \times \text{nombre de quais}$$

Pour le critère d'acceptabilité des véhicules, une note finale est obtenue par type de véhicules en multipliant la traduction numérique de la note qualitative par le nombre de véhicules. La note complète fait la somme sur l'ensemble des types de véhicules.

$$\text{note acceptabilité véhicules} = \sum_{\text{types de véhicules}} \text{traduction quantitative note} \times \text{nombre de véhicules}$$

Pour le critère de congestion induite par les véhicules, une note finale est obtenue en tenant également compte du niveau de congestion des secteurs, qui est également traduit sous forme numérique. L'impact de chaque position en termes de congestion est alors déterminé en multipliant entre-elles les traductions numériques des notes qualitatives associées à la congestion du secteur et du type de véhicule impliqués dans la position. La note complète fait la somme sur l'ensemble des positions.

$$\text{note congestion véhicules} = \sum_{\text{types de véhicules}} \sum_{\text{secteurs}} \text{traduction quantitative notes} \times \text{nombre de positions}$$

Les critères environnementaux sont ainsi combinés de la manière suivante :

$$\text{évaluation environnementale} = \text{coefEnv} \times (\text{polluants véhicules} + \text{note pollution plateformes} + \text{note congestion véhicules})$$

Les critères sociétaux, quant à eux, se traduisent sous la forme :

$$\text{évaluation sociétale} = \text{coefSoc} \times (\text{note acceptabilité plateformes} + \text{note acceptabilité véhicules})$$

La solution optimale recherchée est la solution minimisant la somme des trois termes évaluation économique, évaluation environnementale et évaluation sociétale.

## 5. Compléments sur la modélisation

Dans cette section nous soulevons quelques points qui soit n'ont pas été décrits explicitement ci-dessus, soit ne rentrent pas complètement dans le cadre de la modélisation proposée. Il s'agit donc de préciser les limites des modèles et les perspectives d'amélioration.

Comme cela va transparaître assez clairement tout au long de cette section, les possibilités d'adaptation de l'outil sont multiples. Vouloir tout traiter serait très lourd et risquerait de transformer l'outil en « usine à gaz », ce que nous avons voulu éviter. Par contre, individuellement, chaque point soulevé ci-dessous peut être pris en compte avec un travail de modélisation et de développement souvent assez limité. Pour l'essentiel, c'est donc plus au cas par cas, pour répondre à des besoins précis, que l'outil est destiné à évoluer.

### 5.1 Organisation de la distribution

Comme l'on a pu le vérifier dans le cas de la ville de Marseille, l'organisation classique de la distribution pour la messagerie et la messagerie express consiste à planifier une tournée de livraison le matin et une tournée de collecte l'après-midi.

Dans le modèle lorsque nous évoquons la distribution, nous parlons de servir la demande d'un secteur, ce qui peut aussi bien signifier faire la collecte (tournée de l'après-midi) que la livraison (tournée du matin). Ainsi, il est sous-entendu que chaque véhicule fait une unique tournée chaque jour, ce qui ne correspond pas à la réalité.

Sous l'hypothèse que les tournées du matin et de l'après-midi seraient identiques, il est très simple de corriger ce biais ; il suffit en effet de multiplier par deux les données suivantes pour les véhicules : coût fonctionnement, émission de polluants des véhicules ; et d'augmenter la valeur du pas pour les critères de congestion et d'acceptabilité des véhicules. Ainsi, chaque tournée comptée par l'outil compte double.

En pratique, on sait que les tournées de collecte sont généralement plus courtes que les tournées de livraison, et donc différentes. Une manière de prendre en compte malgré tout les deux types de tournées, est de multiplier le coût de fonctionnement et le niveau d'émission de polluants des véhicules par un facteur compris entre 1 et 2. L'hypothèse sous-jacente est alors que l'affectation des secteurs aux plateformes et le type de véhicules utilisés reste les mêmes pour les tournées de collecte et de livraison, ce qui semble une approximation très raisonnable sachant que l'on se place à un niveau stratégique. Le facteur multiplicatif reflète alors la différence dans le nombre de kilomètre parcourus dans les secteurs entre tournées du matin et tournées de l'après-midi. Par contre, l'inconvénient de cette proposition est d'appliquer le même facteur sur les kilomètres d'approche et de retour, alors que, pour cette partie de la tournée, les kilomètres parcourus le matin ou l'après-midi devraient être identiques.

Dans une version ultérieure de l'outil, il nous faudra mieux gérer cet aspect. On peut par exemple imaginer rajouter un paramètre : nombre de tournées par jour, avec pour chaque tournée autre que

la première, un paramètre additionnel indiquant le pourcentage de la demande à satisfaire sur cette tournée par rapport à la première :

Nombre de tournées	2
Tournée 1	100%
Tournée 2	85%

Il sera alors aisé de mettre à jour le modèle, sans modification de sa structure.

Dans le cas de secteurs multi-véhicules, une autre possibilité pour gérer cette difficulté serait de définir la demande du secteur comme étant la demande cumulée en collectes et en livraisons. Plus de véhicules seront alors nécessaires pour servir le secteur, certains véhicules représentant implicitement les tournées du matin et d'autres les tournées de l'après-midi.

Dans le même esprit, il peut-être intéressant de gérer plusieurs rotations de collecte ou de livraison. Là encore, les réflexions ne sont pas encore entièrement abouties et plusieurs pistes existent. En plus des deux types de possibilités présentées ci-dessus (modifier les coûts, modifier la demande), on peut imaginer introduire des types de véhicules spécifiques. Par exemple, un type de véhicules « double rotation livraison – simple rotation collecte » simulerait la distribution par deux rotations successives le matin, puis une rotation de collecte l'après-midi. Les données associées au type de véhicules resteraient identiques à l'exception des coûts fixes qui seraient divisés par 3. Trois véhicules de ce nouveau type simuleraient alors un véhicule unique faisant trois rotations. Une contrainte indiquant que pour chaque plateforme les véhicules de ce type devraient être sélectionnés en une quantité multiple de trois serait de plus à ajouter dans le modèle, ce qui nécessite quelques développements.

Tenir compte de tournées mixant collecte et livraison, de manière séquentielle (livraison puis collecte, ou l'inverse) est également envisageable, selon les mêmes principes évoqués ci-dessus.

Par contre, gérer des tournées mixant complètement collecte et livraison est plus complexe du fait de la gestion de la capacité des véhicules : relier la capacité du véhicule est le nombre de positions n'a pas de sens dans ce cas car le chargement du véhicule va alternativement augmenter et diminuer selon que le véhicule effectue une collecte ou une livraison.

Notons que, dans le même esprit, la possibilité de faire des livraisons en horaires décalés, la nuit par exemple est envisageable. Les temps de service et d'approche étant dépendant du véhicule, il s'agit de nouveau de définir des types de véhicules spécifiques « livraison de nuit », pour lesquels ces valeurs sont adaptées.

Enfin, des flux annexes (retours, emballages...) peuvent également être pris en compte en complément des flux traditionnels sous la forme de temps de service plus importants.

## 5.2 Gestion du dernier « hectomètre » et de ruptures de charges supplémentaires

Le schéma de distribution envisagé dans le modèle est assez élémentaire : de la plateforme, les véhicules font une tournée, puis reviennent à la plateforme. Chaque position dans la tournée

correspond au service d'un client ou éventuellement d'une boîte logistique. Dans tous les cas, le service est considéré comme limité au service des positions.

Il serait intéressant de pouvoir considérer également des systèmes avec rupture de charge pour le dernier « hectomètre ». Certaines ou toutes les positions seraient alors des points d'accueil, où les marchandises seraient déchargées puis prises en charge par des véhicules ou engins de manutention légers.

Introduire cet étage supplémentaire dans les décisions de localisation d'équipements est hors de portée du modèle : le modèle n'est pas conçu pour localiser à la fois des plateformes et des points d'accueil.

Par contre, considérer l'existence de ces points d'accueil dans la distribution peut s'envisager. En effet la partie finale de la distribution (distribution à partir du point d'accueil) est une constante pour le modèle : le point d'accueil est supposé connu et la demande à servir à partir de ce point d'accueil également. Il s'agit donc uniquement d'introduire ce point d'accueil dans la demande : soit en adaptant en conséquence les données associées au secteur (longueur de tournée plus courte), soit en créant des secteurs mono-véhicules spécifiques à ces points d'accueil. Dans ce dernier cas, la limite actuelle du modèle est de ne pas permettre les tournées mixant secteurs mono-véhicules et secteurs multi-véhicules.

Dans le cas où l'on souhaiterait envisager ou non l'utilisation de points d'accueil, la solution passerait plutôt par la définition de type de véhicules spécifiques (compatibles uniquement avec les secteurs désirés). Le type de véhicule intégrant le point d'accueil aurait alors une longueur de tournée plus courte, au détriment du coût fixe qui intégrerait le coût complet du système terminal de distribution.

Le cas particulier du multimodal, et en particulier le tramway fret, rentre également dans ce cadre. Le tramway est alors un type de véhicules particulier, pour lequel la livraison terminale se fait à coût constant.

### **5.3 Gestion des flux amont aux plateformes**

Les flux en amont des plateformes ne sont pas intégrés de manière explicite dans le modèle. Si l'on considère que l'impact de la position de la plateforme sur les coûts des flux amont est négligeable, ne pas en tenir compte du tout ne pose aucun problème.

Si par contre, la position de la plateforme a une influence sur ces coûts, ils doivent être intégrés dans les coûts variables des plateformes. Ainsi, un certain nombre de quais ouverts pour une plateforme, indique un certain flux de marchandises en amont, et donc un certain coût sur l'horizon de temps considéré.

De même, en dehors des flux de marchandises, on peut vouloir tenir compte des trajets à vide des camions des sous-traitants pour rejoindre les plateformes. De même, cet élément peut être intégré de manière constante lors de la définition des caractéristiques des plateformes (coûts, pollution..).

### **5.4 Mutualisation**

Comme expliqué plus haut, le principe des zones multi-véhicules est un principe de mutualisation. Une extension du modèle serait la prise en compte explicite de plusieurs messagers sans

mutualisation. La demande par secteur devrait alors être indiquée par messenger et les quais ouverts et véhicules utilisés affectés à des messagers.

Mettre en place cette extension reste simple du point de vue de l'écriture des modèles, mais devrait augmenter de manière significative la difficulté du problème d'optimisation à résoudre.

A noter que la version courant de l'interface intègre déjà la possibilité de gérer plusieurs messagers, bien que ces messagers soient considérés comme un messenger unique par le moteur de calcul.

## 5.5 Prise en compte de la dimension dynamique du problème

Du fait de l'horizon de temps considéré dans les calculs, typiquement la durée de vie d'une plateforme, il est simpliste de considérer toute les données définies de manière statique : la demande et les coûts sont de manière évidente amenés à évoluer.

Dans la version actuelle, il est donc important d'essayer d'estimer en moyenne la valeur de ces différentes données au cours de l'horizon de temps considéré. Dans une version future, on peut imaginer indexer ces données sur le temps.

Comme pour la version multi-messagers, mettre en place cette extension reste simple du point de vue de l'écriture des modèles, mais devrait augmenter de manière significative la difficulté du problème d'optimisation à résoudre.

Parmi les évolutions attendues pour ce qui concerne la demande, le développement du e-commerce est évidemment un point-clé. Il ne s'agit pas alors seulement d'une augmentation de la demande (en nombre de positions) mais également d'une évolution de la dimension moyenne des colis (influant donc sur le nombre de positions maximales par véhicule) et des temps de service. Pour tenir compte de manière plus fine de cette partie de la demande, il peut être envisageable dans le futur de désagréger la demande, pour par exemple la représenter en deux sous-parties (partie traditionnelle et e-commerce) aux caractéristiques propres.

Une extension plus complexe serait la prise en compte de saisonnalité. Ainsi, la demande est supposée constante tout au long de l'année, alors que certaines périodes sont susceptibles en pratique de voir une augmentation de la demande. Dans le modèle, cette question peut s'aborder sous l'angle de la robustesse : le schéma de distribution est dimensionné pour une certaine demande, que se passe-t-il si la demande augmente ?

Ainsi, on peut résoudre le problème une première fois, puis figer les plateformes et résoudre de nouveau avec une demande plus importante pour voir l'impact sur la distribution.

La démarche inverse peut également être testée : évaluer le schéma de distribution optimal pour gérer le pic de demande, puis tester son comportement avec une demande plus faible.

# MODELISATION MATHEMATIQUE

Ce document propose différentes modélisations mathématiques pour le problème étudié dans le projet.

## 1. Notations

Les notations ci-dessous sont utilisées dans l'écriture des modèles.

- $D$  : ensemble des secteurs, partitionné en deux sous-ensembles  $D_{single}$  correspondant aux secteurs mono-véhicules et  $D_{multi}$  correspondant aux secteurs multi-véhicules ;
- $L$  : ensemble des surfaces disponibles pour la construction de plateformes ;
- $V$  : ensemble des types de véhicules ;
- $E$  : flotte de véhicules disponibles ( $k_v$  véhicules disponibles par type de véhicules  $v \in V$ , avec  $k_v$  arbitrairement large) ; le type d'un véhicule  $e \in E$  est noté  $v_e$  ;
- $\gamma_d$  : demande du secteur  $d \in D$ , en nombre de positions ;
- $\delta_d$  : distance à parcourir dans le secteur  $d \in D$  pour réaliser le service ;
- $\Delta_d \subseteq D_{single}$  : secteurs compatibles avec le secteur  $d$ , pour  $d \in D_{single}$  ;
- $q_l$  : nombre maximal de quais pouvant être construits si une plateforme est positionnée en  $l \in L$  ;
- $\theta_l$  : nombre de positions pouvant être servies par quai (par jour) à partir de la plateforme  $l \in L$  ;
- $M_{ld}$  : distance entre la plateforme  $l \in L$  et le secteur  $d \in D$  ;
- $c_l^{fix}$  : coût fixe en cas de sélection de la plateforme  $l \in L$  ;
- $c_l^{var}$  : coût variable, par construction de quais, pour la plateforme  $l \in L$  ;
- $\beta_v$  : capacité des véhicules de type  $v \in V$ , en nombre de positions pouvant être servies dans une tournée ;
- $\alpha_v^{dist}$  : autonomie en distance pour les véhicules de type  $v \in V$  ;
- $\alpha_v^{time}$  : autonomie en temps pour les véhicules de type  $v \in V$  ;
- $S_{vd}$  : temps de parcours pour les véhicules de type  $v \in V$  pour servir le secteur  $d \in D$  ;
- $\tau_{lvd}$  : temps de parcours pour les véhicules de type  $v \in V$  pour relier la plateforme  $l \in L$  et le secteur  $d \in D$  ;
- $J_v$  : ensemble des secteurs  $d \in D$  pour lesquelles l'utilisation de véhicule de type  $v$  est interdite ;
- $c_v^{fix}$  : coût fixe d'utilisation pour les véhicules de type  $v \in V$  ;
- $c_v^{var}$  : coût variable d'utilisation, par kilomètres parcourus, pour les véhicules de type  $v \in V$ .

## 2. Modèle dans le cas de secteurs mono-véhicules

Nous considérons pour l'instant le cas où tous les secteurs sont de type mono-véhicule. C'est notamment le cas typique rencontré par un messenger. Deux modèles sont présentés.

### 2.1 Formulation directe

Le modèle est présenté dans la figure 4. Les variables de décision utilisées sont les suivantes :

- $u_l$  : variable binaire égale à 1 si la plateforme  $l$  est sélectionnée, 0 sinon ;
- $w_l$  : nombre de quais construits pour la plateforme  $l$  ;
- $x_{led}$  : variable binaire égale à 1 si le véhicule  $e$  est affecté à la plateforme  $l$  et dessert le secteur  $d$ , 0 sinon ;
- $r_{led}$  : variable binaire égale à 1 si le véhicule  $e$  est affecté à la plateforme  $l$  et si  $d$  est le plus proche des secteurs qu'il dessert.

La fonction objectif (1) minimise une somme pondérée des différents critères :

- coût fixe et coût variable pour la sélection des plateformes : ces coûts intègrent les coûts économiques, plus les critères de pollution et d'acceptabilité des plateformes ; les coûts variables sont proportionnels au nombre de quais ouverts ;
- coût fixe et coût variable pour les véhicules : ces coûts intègrent les coûts économiques, plus le critère d'émission de polluants et les critères d'acceptabilité des véhicules et de congestion ; les coûts variables sont proportionnels à la distance (approximative) parcourue par le véhicule : deux fois la distance au secteur le plus proche depuis la plateforme de départ (comptée pour l'aller et le retour) + somme des distances de parcours internes aux secteurs servis par le véhicule.

Les contraintes (2) limitent le nombre de quais ouverts sur une plateforme et impliquent que des quais ne puissent être construits que lorsque la plateforme est sélectionnée. En effet, lorsque la variable  $u_l$  vaut 0, la seule valeur acceptable pour la variable  $w_l$  est 0 ; dans le cas contraire, toutes les valeurs jusqu'à la limite supérieure  $q_l$  sont autorisées pour  $w_l$ .

Les contraintes (3) limitent le nombre de positions servies depuis les plateformes. Pour chaque plateforme, le terme de gauche calcule le nombre de positions de l'ensemble des secteurs servis par des véhicules associés à la plateforme. Ce nombre est limité à ne pas dépasser la capacité maximale de la plateforme à savoir le nombre de quais ouverts  $w_l$  multiplié par le nombre de positions maximal par quai  $\theta_l$ .

Les contraintes (4) impliquent que chaque secteur est servi : parmi toutes les variables binaires représentant l'attribution possible du secteur à un véhicule, exactement une de ces variables doit prendre la valeur 1.

Les contraintes (5) s'assurent du respect des capacités des véhicules (en nombre de positions maximal). Pour chaque véhicule, le terme de gauche calcule en effet le nombre total de positions servies par le véhicule, limité par la capacité du véhicule.

Les contraintes (6) et (7) s'assurent du respect de l'autonomie des véhicules, en distance parcourue et en temps de parcours, respectivement. De nouveau, pour chaque véhicule, les termes de gauche calculent la consommation, en distance et en temps, respectivement, induite par les trajets plateforme – secteur le plus proche plus les trajets internes aux zones. Le terme de droite indique la valeur maximale autorisée.

$$[P] : \min \sum_{l \in L} (c_l^{\text{fix}} \cdot u_l + c_l^{\text{var}} \cdot w_l) + \sum_{l \in L} \sum_{e \in E} \sum_{d \in D_{\text{single}}} (c_{v_e}^{\text{fix}} \cdot r_{led} + c_{v_e}^{\text{var}} \cdot 2 \cdot M_{ld} \cdot r_{led} + \delta_d \cdot x_{led}) \quad (1)$$

$$w_l \leq q_l \cdot u_l \quad \forall l \in L \quad (2)$$

$$\sum_{e \in E} \sum_{d \in D_{\text{single}}} \gamma_d \cdot x_{led} \leq \theta_l \cdot w_l \quad \forall l \in L \quad (3)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{e \in E} x_{led} = 1 \quad \forall d \in D_{\text{single}} \quad (4)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{d \in D_{\text{single}}} \gamma_d \cdot x_{led} \leq \beta_v \quad \forall e \in E, v = v_e \quad (5)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{d \in D_{\text{single}}} (2 \cdot M_{ld} \cdot r_{led} + \delta_d \cdot x_{led}) \leq \alpha_v^{\text{dist}} \quad \forall e \in E, v = v_e \quad (6)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{d \in D_{\text{single}}} (2 \cdot \tau_{lvd} \cdot r_{led} + S_{vd} \cdot x_{lvd}) \leq \alpha_v^{\text{time}} \quad \forall e \in E, v = v_e \quad (7)$$

$$\sum_{l \in L} x_{led} = 0 \quad \forall e \in E, v = v_e \quad \forall d \in J_v \quad (8)$$

$$\text{card}\{D\} \cdot \sum_{l \in L} x_{led} + \sum_{l \in L} \sum_{d' \in \Delta_d} x_{led'} \leq \text{card}\{D\} \quad \forall e \in E \quad \forall d \in D_{\text{single}} \quad (9)$$

$$r_{led} \leq x_{led} \quad \forall l \in L \quad \forall e \in E \quad \forall d \in D_{\text{single}} \quad (10)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{d \in D_{\text{single}}} x_{led} \leq \text{card}\{D_{\text{single}}\} \cdot \sum_{l \in L} \sum_{d \in D_{\text{single}}} r_{led} \quad \forall e \in E \quad (11)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{d \in D_{\text{single}}} M_{ld} \cdot r_{led} \leq \sum_{l \in L} \sum_{d \in D_{\text{single}}} M_{ld} \cdot x_{led} \quad \forall e \in E \quad (12)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{d \in D_{\text{single}}} r_{led} \leq 1 \quad \forall e \in E \quad (13)$$

$$u_l \in \{0, 1\} \quad \forall l \in L \quad (14)$$

$$w_l \in \mathbb{N} \quad \forall l \in L \quad (15)$$

$$x_{led} \in \{0, 1\} \quad \forall l \in L \quad \forall e \in E \quad \forall d \in D_{\text{single}} \quad (16)$$

$$r_{led} \in \{0, 1\} \quad \forall l \in L \quad \forall e \in E \quad \forall d \in D_{\text{single}} \quad (17)$$

Figure 5 : modèle dans le cas de secteurs mono-véhicules (formulation directe)

Les contraintes (8) gèrent les interdictions réglementaires : il est interdit de sélectionner un véhicule pour le service d'une zone lorsque le type de ce véhicule n'est pas compatible avec les contraintes réglementaires de cette zone. Ainsi, les variables correspondantes sont fixées à 0. Afin de limiter le nombre de contraintes, ces affectations à 0 sont agrégées sous forme de sommes.

Les contraintes (9) évitent que deux zones incompatibles soient servies par le même véhicule. Pour comprendre ces contraintes, il faut considérer deux cas. Soit la variable  $x_{led}$  reçoit la valeur 1 ; dans ce cas la contrainte empêche qu'une variable de la double somme ne prenne également la valeur 1, ce qui revient à interdire qu'une zone incompatible avec  $d$  ne soit servie avec le véhicule  $e$ . Soit la variable  $x_{led}$  reçoit la valeur 0 ; dans ce cas, la contrainte est en fait désactivée car, quelle que soit l'affectation des valeurs aux variables, la double somme aura toujours une valeur inférieure au cardinal de  $D$ .

Les contraintes (10) imposent que le secteur identifié comme étant le plus proche de la plateforme de départ pour un véhicule soit bien servi par ce véhicule : si la variable  $r_{led}$  vaut 1, la variable  $x_{led}$  reçoit également nécessairement la valeur 1.

Les contraintes (11) assurent qu'à tout véhicule actif (c'est-à-dire servant des zones) est attribuée une zone de départ. En effet, s'il existe une variable  $x_{led}$  non nulle (terme de gauche non nul), alors il est nécessaire qu'il existe une variable  $r_{led}$  non nulle (terme de droite non nul). A noter que le « choix » du secteur considéré comme le plus proche n'est pas défini sous forme de contrainte : c'est du fait de la définition de la fonction objectif que naturellement il est préférable de sélectionner pour la variable  $r_{led}$  le secteur le plus proche.

Les contraintes (12) et (13) sont deux séries de contraintes redondantes, qui servent à renforcer la formulation, dans le but d'une résolution plus efficace. Les contraintes (12) imposent le choix de la zone la plus proche pour les véhicules. Les contraintes (13) imposent de ne sélectionner qu'une zone la plus proche par véhicule.

Enfin, les contraintes (14) à (17) établissent le domaine de définition des variables.

## 2.2 Formulation agrégée

Ce modèle considère de manière explicite toutes les combinaisons de secteurs pouvant être affectées à un véhicule. Du fait des contraintes de compatibilités de secteurs et du faible nombre de secteurs pouvant être servis par un unique véhicule en pratique, cet ensemble reste de taille limitée.

Les notations supplémentaires suivantes sont introduites :

- $T$  : ensemble des ensembles de secteurs compatibles ; un sous-ensemble  $t \subset D_{single}$  appartient à  $T$  si et seulement si il n'existe pas  $d \in t$  et  $d' \in l$  avec  $d' \text{ in } \Delta_d$  ;
- $\gamma_t$  : demande cumulée des secteurs de l'ensemble  $t \in T$  ( $\gamma_t = \sum_{d \in t} \gamma_d$ ) ;
- $\delta_{lt}$  : distance totale à parcourir pour assurer la distribution pour les secteurs de  $t \in T$  à partir de la plateforme  $l \in L$  ( $\delta_{lt} = 2 \times \min_{d \in t} M_{ld} + \sum_{d \in t} \delta_d$ ) ;
- $\tau_{lvt}$  : durée totale de la distribution pour les secteurs de  $t \in T$  à partir de la plateforme  $l \in L$  ( $\tau_{lvt} = 2 \times \tau_{lvd'} + \sum_{d \in T} S_{vd}$ , avec  $d' = \operatorname{argmin}_{d \in T} M_{ld}$ ).

Le modèle est présenté dans la figure 6. Les variables de décisions sont les suivantes :

- $u_l$  : variable binaire égale à 1 si la plateforme  $l$  est sélectionnée, 0 sinon ;
- $w_l$  : nombre de quais construits pour la plateforme  $l$  ;
- $x_{lvt}$  : variable binaire égale à 1 si un véhicule de type  $t$  est affecté à la plateforme  $l$  et dessert le secteur l'ensemble de secteurs  $t$ .

La fonction objectif (18) est une réécriture de la fonction objectif (1) avec les nouvelles notations. Les contraintes (19) sont identiques aux contraintes (2), les contraintes (20) et (21) étant équivalentes aux contraintes (3) et (4). Les contraintes (22) à (24) traduisent les contraintes de capacité et d'autonomies (contraintes (5) à (7) dans le précédent modèle), en interdisant la sélection d'éléments de  $T$  ne respectant pas ces contraintes ; en pratique, les variables correspondantes peuvent en fait être supprimées du modèle. Les contraintes (25) sont une réécriture des contraintes (8). Aucune contrainte n'est nécessaire pour gérer les anciennes contraintes (9) à (13), qui sont maintenant traitées à travers la définition de l'ensemble  $T$  et des notations associées. Les contraintes (26) à (28) établissent enfin les domaines de définition des variables.

$$[CLP_{single}] : \min \sum_{l \in L} (c_l^{fix} \cdot u_l + c_l^{var} \cdot w_l) + \sum_{l \in L} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} (c_v^{fix} \cdot x_{lvt} + c_v^{var} \cdot \delta_{lt} \cdot x_{lvt}) \quad (18)$$

$$w_l \leq q_l \cdot u_l \quad \forall l \in L \quad (19)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \gamma_t \cdot x_{lvt} \leq \theta_l \cdot w_l \quad \forall l \in L \quad (20)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{v \in V} \sum_{\substack{t \in T \\ d \in t}} x_{lvt} = 1 \quad \forall d \in D_{single} \quad (21)$$

$$\sum_{l \in L} x_{lvt} - 0 \quad \forall v \in V \quad \forall t \in \{t' \in T | \beta_v < \sum_{d \in t'} \gamma_d\} \quad (22)$$

$$x_{lvt} = 0 \quad \forall l \in L \quad \forall v \in V \quad \forall t \in \{t' \in T | \alpha_v^{dist} < \delta_{lt'}\} \quad (23)$$

$$x_{lvt} = 0 \quad \forall l \in L \quad \forall v \in V \quad \forall t \in \{t' \in T | \alpha_v^{time} < \tau_{lvt'}\} \quad (24)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{\substack{t \in T \\ d \in t}} x_{lvt} = 0 \quad \forall v \in V \quad \forall d \in J_v \cap D_{single} \quad (25)$$

$$u_l \in \{0, 1\} \quad \forall l \in L \quad (26)$$

$$w_l \in \mathbb{N} \quad \forall l \in L \quad (27)$$

$$x_{lvt} \in \{0, 1\} \quad \forall l \in L \quad \forall v \in V \quad \forall t \in T \quad (28)$$

Figure 7 : modèle dans le cas de secteurs mono-véhicules (formulation agrégée)

Un intérêt de ce modèle est de ne pas introduire explicitement les véhicules. La contrepartie est l'utilisation de l'ensemble T, potentiellement de grande taille.

## 2. Modèle dans le cas de secteurs multi-véhicules

Nous considérons maintenant le cas où tous les secteurs  $D$  sont de type multi-véhicules. C'est notamment le cas typique rencontré par les autorités locales.

Le modèle est présenté dans la figure 8. Les variables de décisions sont les suivantes :

- $u_l$  : variable binaire égale à 1 si la plateforme  $l$  est sélectionnée, 0 sinon ;
- $w_l$  : nombre de quais construits pour la plateforme  $l$  ;
- $y_{lvd}$  : nombre de véhicules de type  $v$  affectés à la plateforme  $l$  et desservant le secteur  $d$  ;
- $z_{lvd}$  : nombre de livraisons effectuées par les véhicules de type  $v$  affectés à la plateforme  $l$  et desservant le secteur  $d$ .

La fonction objectif (29) est identique à (1) pour la partie concernant les plateformes. Pour les véhicules, les coûts fixes et la partie des coûts variables concernant le trajet plateforme – secteur sont obtenus par simple mise à jour des variables. La partie des coûts variables concernant la distance parcourue dans les secteurs est par contre mise à jour, de manière à compter, pour chaque type de véhicules, la distance parcourue proportionnellement au nombre de positions servies.

Les contraintes (30) sont identiques aux contraintes (2). Les contraintes (31) à (35) sont une réécriture des contraintes (3) à (7). Précisons que pour les contraintes de respect d'autonomie des véhicules (34) (resp. (35)), la consommation en distance (resp. temps) est de nouveau définie en tenant compte

de la proportion de positions réalisées dans le secteur. Les contraintes (36) reprennent les contraintes (8) pour la gestion des interdictions règlementaires. Les contraintes (37) à (40) servent enfin à la définition des domaines des variables.

$$[CLP_{multi}] \min \sum_{l \in L} (c_l^{fix} \cdot u_l + c_l^{var} \cdot w_l) + \sum_{l \in L} \sum_{v \in V} \sum_{d \in D_{multi}} \left( c_v^{fix} \cdot y_{lvd} + c_v^{var} \cdot 2 \cdot M_{ld} \cdot y_{lvd} + \frac{\delta_d}{\gamma_d} \cdot z_{lvd} \right) \quad (29)$$

$$w_l \leq q_l \cdot u_l \quad \forall l \in L \quad (30)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{d \in D_{multi}} z_{lvd} \leq \theta_l \cdot w_l \quad \forall l \in L \quad (31)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{v \in V} z_{lvd} = \gamma_d \quad \forall d \in D_{multi} \quad (32)$$

$$z_{lvd} \leq \beta_v \cdot y_{lvd} \quad \forall l \in L \quad \forall v \in V \quad \forall d \in D_{multi} \quad (33)$$

$$2 \cdot M_{ld} \cdot y_{lvd} + \frac{\delta_d}{\gamma_d} \cdot z_{lvd} \leq y_{lvd} \cdot \alpha_v^{dist} \quad \forall l \in L \quad \forall v \in V \quad \forall d \in D_{multi} \quad (34)$$

$$2 \cdot \tau_{lvd} \cdot y_{lvd} + \frac{S_{vd}}{\gamma_d} \cdot z_{lvd} \leq y_{lvd} \cdot \alpha_v^{time} \quad \forall l \in L \quad \forall v \in V \quad \forall d \in D_{multi} \quad (35)$$

$$\sum_{l \in L} (y_{lvd} + z_{lvd}) = 0 \quad \forall v \in V \quad \forall d \in \{J_v \cap D_{multi}\} \quad (36)$$

$$u_l \in \{0, 1\} \quad \forall l \in L \quad (37)$$

$$w_l \in \mathbb{N} \quad \forall l \in L \quad (38)$$

$$y_{lvd} \in \mathbb{N} \quad \forall l \in L \quad \forall v \in V \quad \forall d \in D_{multi} \quad (39)$$

$$z_{lvd} \in \mathbb{N} \quad \forall l \in L \quad \forall v \in V \quad \forall d \in D_{multi} \quad (40)$$

Figure 9 : modèle dans le cas de secteurs multi-véhicules

Comme pour le modèle agrégé dans le cas traitant des secteurs mono-véhicules, il n'est ici pas nécessaire d'introduire explicitement les véhicules.

### 3. Modèle générique

Finalement, nous présentons maintenant un modèle complet intégrant simultanément les deux types de secteurs : secteurs mono-véhicule, secteurs multi-véhicules. Ce modèle est obtenu par simple concaténation des modèles présentés en sections 1.2 et 2, qui ont été conçus dans l'optique de permettre cette concaténation.

Les variables de décision sont ainsi les mêmes que celles utilisées dans ces deux modèles. Le modèle générique est présenté dans la figure 10. La fonction objectif combine les fonctions (18) et (29). La contrainte (42) reprend les contraintes (19) et (30) à l'identique. La contrainte (43) combine les contraintes (20) et (31). Les contraintes (44), (46), (48), (50), (52) reprennent les contraintes (21) à (25) du modèle dédié aux secteurs mono-véhicules. Les contraintes (45), (47), (49), (51), (53) reprennent les contraintes (32) à (36) du modèle dédié aux secteurs multi-véhicules. Les contraintes (54) à (58) établissent enfin les domaines de définition des variables.

$$[CLP] \min \sum_{l \in L} (c_l^{\text{fix}} \cdot u_l + c_l^{\text{var}} \cdot w_l) + \sum_{l \in L} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} (c_v^{\text{fix}} \cdot x_{lvt} + c_v^{\text{var}} \cdot \delta_{lt} \cdot x_{lvt}) + \sum_{l \in L} \sum_{v \in V} \sum_{d \in D_{\text{multi}}} \left( c_v^{\text{fix}} \cdot y_{lvd} + c_v^{\text{var}} \cdot 2 \cdot M_{ld} \cdot y_{lvd} + \frac{\delta_d}{\gamma_d} \cdot z_{lvd} \right) \quad (41)$$

$$w_l \leq q_l \cdot u_l \quad \forall l \in L \quad (42)$$

$$\sum_{v \in V} \left( \sum_{t \in T} \gamma_t \cdot x_{lvt} + \sum_{d \in D_{\text{multi}}} z_{lvd} \right) \leq \theta_l \cdot w_l \quad \forall l \in L \quad (43)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{v \in V} \sum_{\substack{t \in T \\ d \in t}} x_{lvt} = 1 \quad \forall d \in D_{\text{single}} \quad (44)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{v \in V} z_{lvd} = \gamma_d \quad \forall d \in D_{\text{multi}} \quad (45)$$

$$\sum_{l \in L} x_{lvt} = 0 \quad \forall v \in V \quad \forall t \in \{t' \in T \mid \beta_v < \sum_{d \in t'} \gamma_d\} \quad (46)$$

$$z_{lvd} \leq \beta_v \cdot y_{lvd} \quad \forall l \in L \quad \forall v \in V \quad \forall d \in D_{\text{multi}} \quad (47)$$

$$x_{lvt} = 0 \quad \forall l \in L \quad \forall v \in V \quad \forall t \in \{t' \in T \mid \alpha_v^{\text{dist}} < \delta_{lt'}\} \quad (48)$$

$$2 \cdot M_{ld} \cdot y_{lvd} + \frac{\delta_d}{\gamma_d} \cdot z_{lvd} \leq y_{lvd} \cdot \alpha_v^{\text{dist}} \quad \forall l \in L \quad \forall v \in V \quad \forall d \in D_{\text{multi}} \quad (49)$$

$$x_{lvt} = 0 \quad \forall l \in L \quad \forall v \in V \quad \forall t \in \{t' \in T \mid \alpha_v^{\text{time}} < \tau_{lvt'}\} \quad (50)$$

$$2 \cdot \tau_{lvd} \cdot y_{lvd} + \frac{S_{vd}}{\gamma_d} \cdot z_{lvd} \leq y_{lvd} \cdot \alpha_v^{\text{time}} \quad \forall l \in L \quad \forall v \in V \quad \forall d \in D_{\text{multi}} \quad (51)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{\substack{t \in T \\ d \in t}} x_{lvt} = 0 \quad \forall v \in V \quad \forall d \in \{\bar{J}_v \cap D_{\text{single}}\} \quad (52)$$

$$\sum_{l \in L} (y_{lvd} + z_{lvd}) = 0 \quad \forall v \in V \quad \forall d \in \{\bar{J}_v \cap D_{\text{multi}}\} \quad (53)$$

$$u_l \in \{0, 1\} \quad \forall l \in L \quad (54)$$

$$w_l \in \mathbb{N} \quad \forall l \in L \quad (55)$$

$$x_{lvt} \in \{0, 1\} \quad \forall l \in L \quad \forall v \in V \quad \forall t \in T \quad (56)$$

$$y_{lvd} \in \mathbb{N} \quad \forall l \in L \quad \forall v \in V \quad \forall d \in D_{\text{multi}} \quad (57)$$

$$z_{lvd} \in \mathbb{N} \quad \forall l \in L \quad \forall v \in V \quad \forall d \in D_{\text{multi}} \quad (58)$$

Figure 11 : modèle générique

C'est ce modèle qui est intégré dans l'outil d'aide à la décision développé dans le cadre du projet.

#### 4. Validation des modèles

Afin de valider les modèles, deux séries d'expérimentations ont été menées.

Des expérimentations sur des données issues de la ville de Marseille ont permis de s'assurer de la cohérence des résultats obtenus.

Afin de confronter les modèles à d'autres jeux de données, un constructeur aléatoire d'instances a été développé. Le constructeur est paramétré de manière à ce que les instances générées conservent des caractéristiques assez similaires à celles observées dans le cas de Marseille.

Les expérimentations ont permis de montrer l'efficacité des modèles et leur capacité à résoudre rapidement des instances de taille supérieure à celles utilisées pour Marseille.

Les travaux sur le générateur d'instances et sur l'évaluation des modèles, pouvant éventuellement aboutir au développement de nouveaux modèles ou méthodes de résolution, sont actuellement poursuivis au sein de l'Ecole des Mines de Saint-Etienne. Ces travaux dépassent cependant le cadre du projet et sont trop préliminaires pour être détaillés ici.

# OUTIL D'AIDE A LA DECISION

Ce document présente le fonctionnement du logiciel d'aide à la décision développé au cours du projet. Le logiciel est développé en JAVA et utilise le solveur GLPK (logiciel libre).

## Table des matières

1. Installation.....	63
1.1 Décompression.....	63
1.2 Description rapide des éléments fournis .....	63
1.3 Exécution .....	63
1.4 Principe général.....	64
2. Détails sur les éléments fournis .....	64
2.1 Répertoire data .....	64
2.2 Répertoire doc.....	65
2.3 Répertoire ressources .....	65
3. La fenêtre de lancement .....	66
3.1 Ouvrir une (ou des) solution(s).....	66
3.2 Créer une solution .....	67
3.3 Supprimer une (ou des) solution(s).....	68
4. La fenêtre de solution .....	68
4.1 L'image centrale .....	68
4.2 Bandeau latéral d'évaluation .....	69
5. Menu .....	70
5.1 Menu Solution .....	70
5.2 Menu Données .....	70
5.3 Menu Vue .....	72
5.4 Menu Calcul.....	73
5.5 Menu Admin.....	74

# 1. Installation

Pour que l'application puisse fonctionner, la machine hôte doit posséder JAVA.

## 1.1 Décompression

L'application est distribuée sous la forme d'une archive PLUME.zip à décompresser. Un répertoire PLUME est créé, dont le contenu est affiché dans la figure 12.

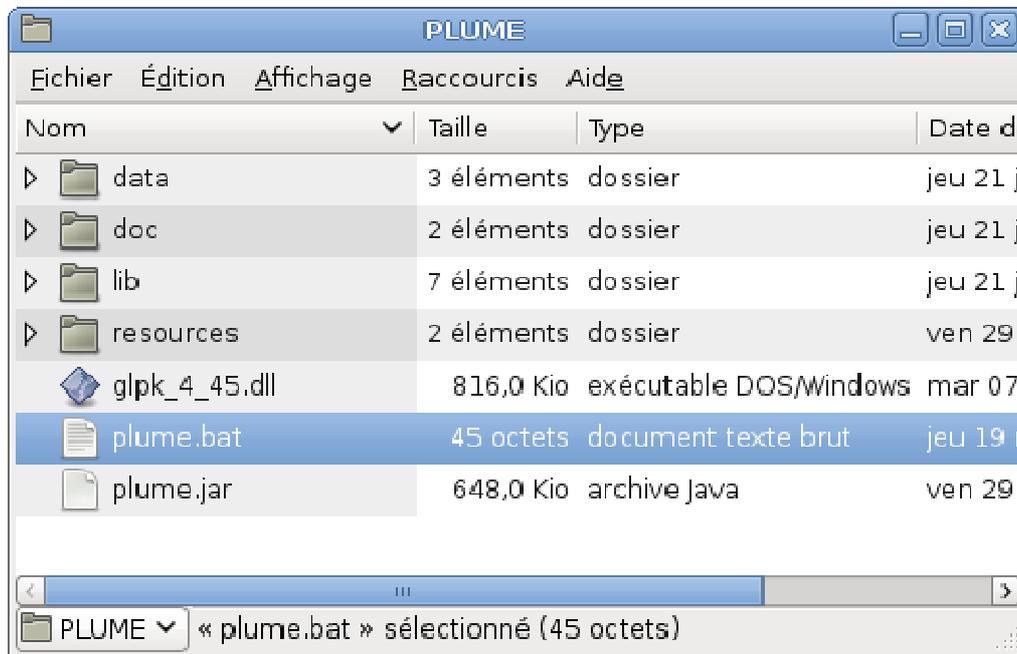


Figure 13 : contenu du répertoire PLUME

## 1.2 Description rapide des éléments fournis

L'archive PLUME.zip contient les éléments suivants :

- Répertoire data : contient les dictionnaires des langues utilisables pour l'interface de PLUME au format texte ;
- Répertoire doc : contient la documentation sur PLUME ;
- Répertoire lib : contient certaines bibliothèques utilisées par PLUME, notamment pour l'utilisation du solveur Glpk ;
- Répertoire ressources : contient les fichiers de données, les solutions, plus des ressources internes au logiciel ;
- Fichier glpk\_4\_45.dll : fichier nécessaire à l'utilisation du solveur Glpk ;
- Fichier plume.bat : script d'exécution de PLUME (voir section suivante) ;
- Fichier plume.jar : archive contenant l'application.

## 1.3 Exécution

Pour lancer l'application, il suffit d'exécuter le fichier plume.bat.

Ce fichier contient un appel au programme JAVA sur l'application contenue dans le fichier plume.jar, en spécifiant le chemin d'accès aux bibliothèques additionnelles (situées dans le répertoire PLUME/lib/).

Un raccourci vers ce fichier peut-être copié puis exécuté à partir du bureau par exemple.

Il se peut que l'application ne démarre pas si l'exécutable JAVA n'est pas dans la variable d'environnement PATH. On peut remédier à cela :

- en ajoutant en début de ligne le chemin d'accès à l'application JAVA ;
- ou en modifiant la variable PATH parmi les variables d'environnement du système.

A noter que le fichier plume.bat peut être édité et modifié avec un éditeur de texte (Wordpad par exemple).

## 1. 4 Principe général

Le fonctionnement de l'outil est basé sur la notion de **solution**. Informatiquement, une solution est en fait un ensemble de fichiers contenant toutes les données décrivant un cas d'étude plus un fichier solution, c'est-à-dire proposant une organisation de la distribution (éventuellement vide si aucune solution n'a encore été calculée). Tous ces **fichiers sont regroupés dans un même répertoire** portant le nom de la solution. Les fichiers sont de type .csv, qui peut être édité sous Excel.

Toute expérimentation commence par l'ouverture d'une solution, la modification éventuelle de données ou paramètres, puis l'exécution du moteur d'optimisation, qui calcule et affiche, en tenant compte des modifications apportées, une nouvelle solution.

Chaque expérimentation nouvelle peut se faire :

- Soit en écrasant la solution actuelle ;
- Soit en changeant le nom de la solution, impliquant ainsi la création d'un nouveau répertoire dans lequel sont copiés l'ensemble des fichiers.

Pour travailler sur des **jeux de données entièrement nouveaux**, il est conseillé de travailler directement sur les fichiers de données, sous Excel, sans passer par le logiciel. Bien que le logiciel permette de faire toutes les modifications nécessaires, l'interface reste en effet peu pratique pour des modifications importantes.

## 2. Détails sur les éléments fournis

### 2.1 Répertoire data

Ce répertoire contient les dictionnaires des langues utilisables. Tous les fichiers sont au format texte et sont aisément modifiables.

Deux langues sont proposées : anglais et français ; la sélection par défaut est le français. Il est possible de modifier la langue par défaut en modifiant le fichier dico.txt de la manière suivante : changer la première ligne en *selected english*. Cette possibilité n'est pas offerte par l'interface, qui ne permet que de modifier le choix courant.

Il est possible de modifier des affichages en mettant à jour les fichiers .dic. Ces fichiers sont organisés de la manière suivante : chaque ligne est composée d'une clé interne (un ou plusieurs mots), d'un séparateur `:` ; puis d'un texte correspondant à l'affichage visible pour l'utilisateur. C'est cette dernière partie qui peut être mise à jour en cas de besoin.

## 2.2 Répertoire doc

Ce répertoire est dédié à la documentation. La documentation utilisateur est disponible dans le répertoire userdoc.

Une documentation technique est disponible dans le répertoire javadoc ; cette documentation est accessible par le fichier index.html et ne concerne que la structuration interne de l'application (classes java) ; les sources n'étant pas fournies par défaut, cette documentation n'est pas exploitable en l'état...

## 2.3 Répertoire ressources

Ce répertoire est structuré de la manière suivante ; le répertoire default contient des ressources internes au logiciel ; **les autres répertoires contiennent les solutions** (solution arrondissement dans le répertoire Marseille au moment de l'installation).

Il est important de ne pas déplacer le répertoire default.

Le stockage des solutions peut être organisé différemment, et ailleurs, selon les préférences de l'utilisateur. Un fichier, portant le nom de la solution complété par l'extension .csv, répertorie l'ensemble des noms de fichiers utilisés.

Douze fichiers sont nécessaires, identifiés par les mots-clés suivants :

- Map : image en fond d'écran ;
- Company : nom des messagers (un seul messenger géré dans la version actuelle de l'outil) ;
- Vehicle : informations sur les types de véhicules ;
- Sector : informations sur les secteurs de la zone géographique étudiée ;
- Platform : information sur les plateformes pouvant être construites ;
- Demand : information sur la demande des secteurs ;
- Unauthorized : informations sur les interdictions réglementaires ;
- Compatible : matrice d'incompatibilité pour les secteurs mono-véhicules ;
- Service : durées de service ;
- Durations : durées de parcours ;
- Distances : distances ;
- Selection : descriptif de la solution

Chaque fichier contient une catégorie de données. Un en-tête explicite le contenu des différentes colonnes et du type d'informations trouvées dans le fichier.

En plus de ces douze fichiers, un treizième fichier (quatorzième en comptant aussi le fichier portant le nom de la solution), intitulé .literals.csv, indique la valeur des pas pour les critères qualitatifs.

La pratique recommandée est de créer un répertoire par cas d'étude, dans lequel seront sauvegardées toutes les solutions correspondant à ce cas d'étude (un répertoire par solution). Un répertoire supplémentaire peut-être utilisé pour l'image de fond d'écran (répertoire common/images dans le cas présent).

### 3. La fenêtre de lancement

Cette fenêtre (figure 14) s'ouvre au lancement du programme. Elle donne l'accès à l'ouverture, la suppression et la création de solutions. Cette fenêtre reste présente malgré l'ouverture d'autres fenêtres par le programme. Sa fermeture entraîne la fermeture du programme et de toutes les fenêtres ouvertes **sans aucune sauvegarde**.



Figure 15 : fenêtre de lancement

#### 3.1 Ouvrir une (ou des) solution(s)

L'appui sur le bouton 'Ouvrir Solution' permet de sélectionner et d'ouvrir une ou plusieurs solutions. Une fenêtre s'ouvre pour chacune des solutions sélectionnées. La sélection d'une solution se fait en sélectionnant le répertoire contenant les fichiers .csv décrivant la solution (voir figure 16). Comme dans l'exemple, seules des solutions stockées dans des répertoires situés dans un même répertoire (répertoire Marseille ici) peuvent être ouvertes d'un seul coup. Des solutions de répertoires distincts peuvent être ouvertes successivement par plusieurs appels au bouton 'Ouvrir solution'. L'action est effectuée après un click sur le bouton 'Ouvrir'.

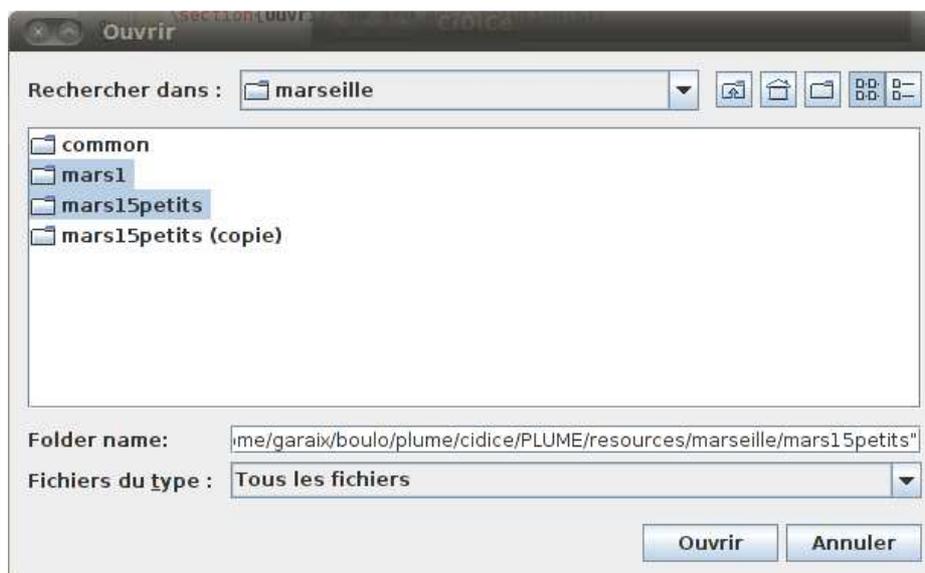


Figure 17 : ouverture de deux solutions

### 3.3 Créer une solution

L'appui sur le bouton 'Créer Solution' permet de créer une solution. Dans la fenêtre d'exploration ouverte, voir figure 18, l'utilisateur doit se diriger (ou créer via le bouton de création de répertoire) vers le répertoire devant accueillir le répertoire solution (contenant les futurs fichiers de la nouvelle solution). Il doit alors indiquer le nom désiré par la nouvelle solution.

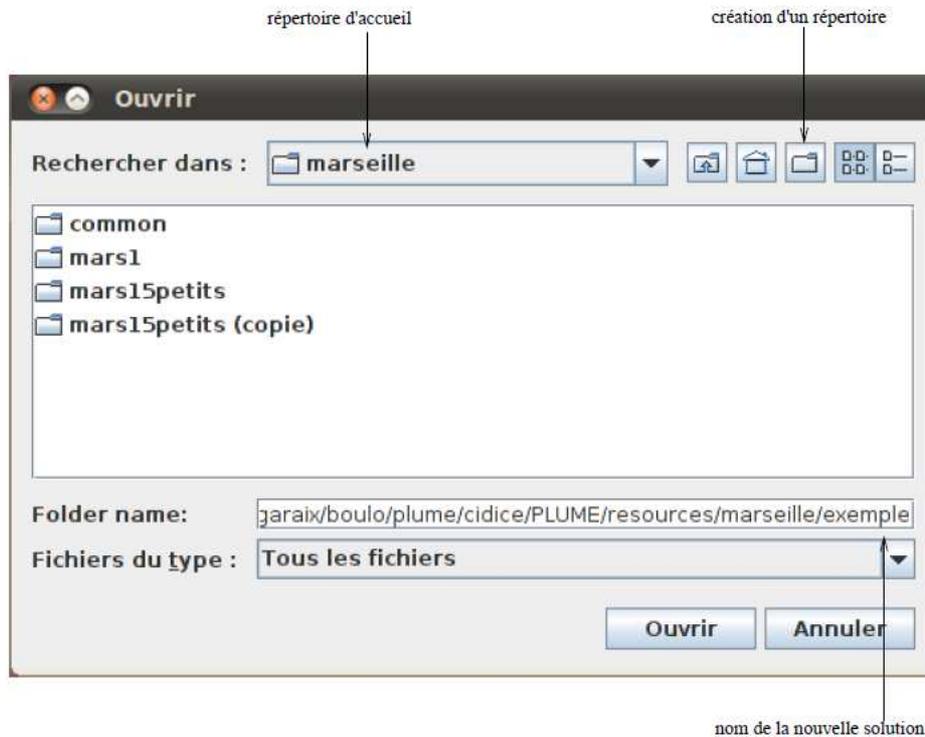


Figure 19 : création d'une solution

Dans notre exemple, l'utilisateur s'est dirigé dans le répertoire 'marseille' et a indiqué qu'il souhaitait y créer une solution 'exemple'. S'il sélectionne le bouton 'Ouvrir', un sous-répertoire 'exemple' sera créé dans le répertoire 'marseille' et contiendra tous fichiers propres à la solution 'exemple'. Une fenêtre identique à celle de la figure 20 s'ouvrira.

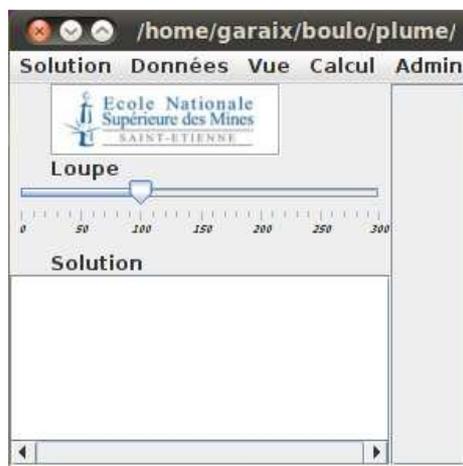


Figure 21 : interface pour la création d'une nouvelle solution

Pour alimenter cette solution, et la sauvegarder il faut se rendre dans les menus 'Données' et 'Solution', respectivement. Comme indiqué précédemment, il est cependant préférable de modifier directement les fichiers à l'aide d'un tableur. L'intérêt principal de l'option 'Création Solution' est en fait de créer les fichiers sous le bon format et avec la bonne structure.

### 3.3 Supprimer une (ou des) solution(s)

L'appui sur le bouton 'Supprimer Solution' permet de supprimer une ou plusieurs solutions. Les solutions sélectionnées sont entièrement supprimée (répertoires effacés sur le disque). A noter que cette opération peut se faire de manière équivalente en supprimant les répertoires manuellement.

## 4. La fenêtre de solution

Chaque solution ouverte est affichée dans une fenêtre à partir de laquelle l'utilisateur trouve toutes les fonctionnalités de manipulation de cette solution. La figure 22 illustre la notion de fenêtre solution.

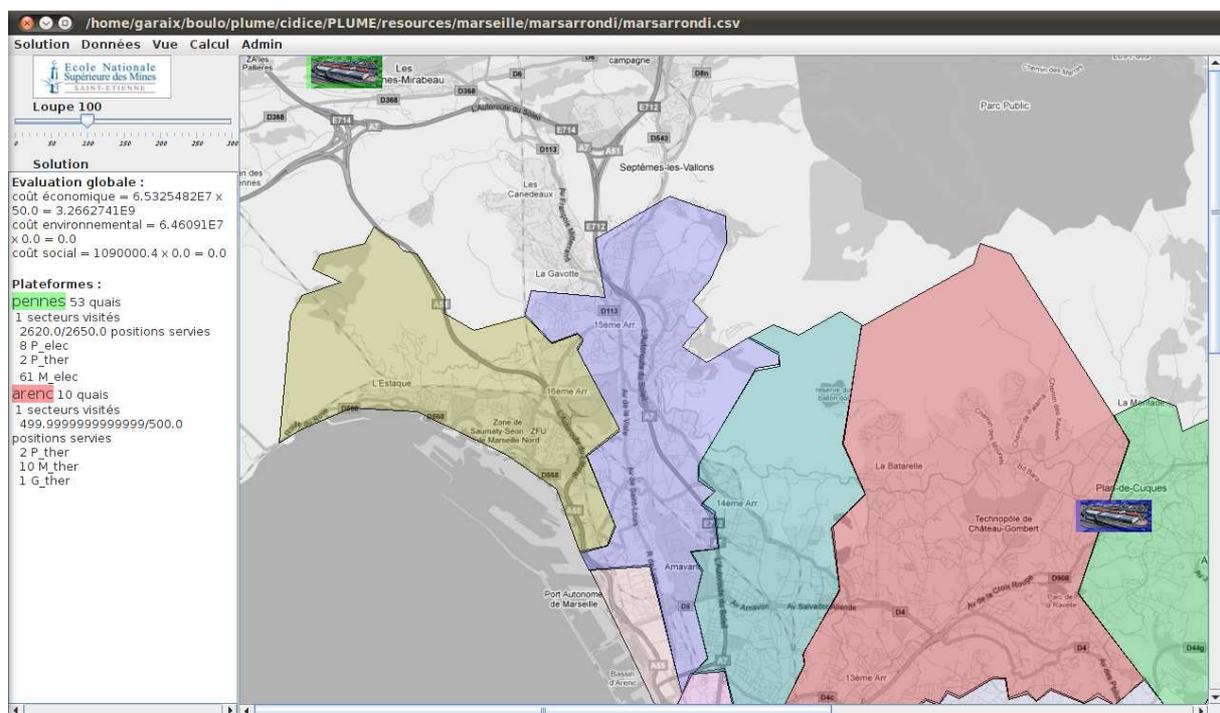


Figure 23 : exemple de fenêtre solution

Cinq zones sont définies :

- Titre
- Menus
- Loupe
- Bandeau latéral d'évaluation
- Image centrale

Le titre dans la barre en haut de la fenêtre, donne le chemin complet du fichier principal décrivant la solution. Ce dernier a le même nom que le dossier le contenant, suivi de l'extension ``.csv''.

La zone de loupe permet de modifier l'échelle de l'image centrale.

#### 4.1 L'image centrale

Dans cet espace est affiché le fond de carte, les zones de demande et les plateformes. Il y a deux types d'affichage : complet et sélection. Le dernier mode représente uniquement les plateformes sélectionnées et colorie les zones en fonction de la plateforme assurant leur service.

Un clic sur un objet graphique (plateforme ou zone de demande) affiche quelques informations sur l'objet pointé.

#### 4.2 Bandeau latéral d'évaluation

Le bandeau latéral d'évaluation, à gauche dans la figure 24, agrandi dans la figure 25, affiche les évaluations associées à la solution proposée courante. Il contient des informations sur la valeur des critères d'optimisation et sur le schéma de distribution.



Figure 26 : bandeau latéral d'évaluation

#### Critères d'optimisation

Les critères sont de trois natures différentes : économique, environnementale ou sociétale. Seules les valeurs nominales rentrées par l'utilisateur sont prises en compte dans l'optimisation. **Ces valeurs n'ont donc pas d'unité.** Il revient à l'utilisateur de veiller à l'uniformisation et la normalisation des données. Il est par contre possible (voir Menu Calcul) d'ajuster les poids affectés à chaque critère afin de régler le sens de l'optimisation.

La valeur de chaque critère est détaillée de la manière suivante :

- valeur brute du critère ;
- $\times$  coefficient de pondération défini au lancement du calcul ;
- = valeur pondérée du critère (le moteur d'optimisation minimisant la somme pondérée des trois critères).

L'indicateur de qualité indique la proximité entre la valeur de la solution proposée et la solution optimale mathématiquement (la durée maximale d'exécution étant volontairement limitée, il est possible que la solution retournée ne soit l'optimum mathématique). Sur l'exemple, il est possible qu'il existe des solutions meilleures dans la limite d'une baisse de l'évaluation totale de 0,3 %.

La durée d'exploitation indiquée au lancement du calcul est enfin rappelée.

### Schéma de distribution

La liste des plateformes sélectionnées est affichée, avec le code de couleur utilisé dans l'affichage de la solution.

Pour chaque plateforme sélectionnée, sont affichées plusieurs caractéristiques :

- Le nombre de quais la composant ;
- Le nombre de secteurs couverts ;
- Le nombre de positions servies, par rapport au nombre maximal pouvant être servi (au vu du nombre de quais ouverts) ;
- Une description de la flotte de véhicules utilisés, par type de véhicules.

Une vision détaillé sur les routes planifiées (plateforme, type de véhicule, secteur(s) visité(s)) est accessible par le bouton 'Details de la solution'.

## 5. Menu

Le menu est composé de cinq thèmes : Solution, Données, Vue, Calcul et Admin. L'interaction avec la solution se fait uniquement via ce menu.

### 5.1 Menu Solution

Les fonctions de ce menu permettent de gérer la solution et le dossier contenant ses fichiers '\*.csv' la décrivant.

#### Sous-menu Enregistrer

Un clic sur le mot enregistrer va sauvegarder la solution dans son état courant. L'ancien état de la solution est ainsi écrasé.

#### Sous-menu Copier

Permet de dupliquer la solution dans un nouveau dossier avec un nouveau nom.

### 5.2 Menu Données

A partir de ce menu, les données de la solution sont visibles et éditables. L'édition peut se faire directement via l'interface ou par importation et exportation de fichiers '\*.csv'. Ces fonctions sont accessibles par les boutons 'exporter' et 'importer' sur chaque fenêtre d'édition. Il est aussi possible d'imprimer directement ces données.

Une fois validée (par le bouton 'valider'), les données sont prises en compte pour la session active mais ne sont pas sauvegardées après fermeture de l'application.

#### Sous-menu Carte

Il s'agit de sélectionner le fichier image du fond de carte.

#### Sous-menu Zone

Affiche les zones de demande et leurs caractéristiques. L'édition dans une ligne vierge permet l'ajout d'une nouvelle zone.

- Nom : Nom de la zone.
- Longueur : Longueur (en km par exemple) d'une tournée dans cette zone.
- Congestion : Niveau de congestion de la zone. `A' est le moins congestionné.
- Multivéhicule : Le service de la zone peut faire l'objet de plusieurs tournées. Cette zone ne peut ainsi pas être groupée avec une autre au sein d'une même tournée.

Il est possible de dessiner ou de supprimer la zone couramment sélectionnée. Les colonnes couleur et transparence permettent de modifier les affichages. La colonne visible permet de visualiser ou non la zone. Le contour de la zone est mémorisé, dans la couleur forme, par l'intermédiaire de la liste des coordonnées de ses points extrêmes.

La colonne modèle indique si la zone doit être prise en compte ou non dans le modèle d'optimisation.

### Sous-menu Plateforme

Affiche les plateformes et leurs caractéristiques. L'édition dans une ligne vierge permet l'ajout d'une nouvelle plateforme.

- Nom : Nom de la plateforme
- Min dock : Nombre de quais déjà existants pour cette plateforme. A fortiori, la plateforme existe déjà si ce nombre est strictement positif.
- Quais max : Nombre maximum de quais pouvant être construits à cet emplacement. Les quais déjà existants sont inclus dans ce compte.
- Fixe€ : Coût fixe de bâtir une plateforme à cet emplacement.
- Accep. : Acceptabilité de la construction d'une plateforme à cet emplacement.
- Quai€ : Coût fixe de construction d'un quai.
- Quai poll. : Pollution liée à un quai.
- Quai serv. : Nombre de positions pouvant être servies par un quai.

Les colonnes sel. et quai indiquent les plateformes proposées dans la solution et le nombre de quais correspondant. La colonne modèle indique si la plateforme doit être prise en compte ou non dans le modèle d'optimisation. La valeur de cette dernière colonne peut également être changée au moment de l'appel au moteur d'optimisation (voir Menu Calcul).

La colonne visible et les trois dernières colonnes concernent l'affichage.

### Sous-menu Véhicule

Affiche les types de véhicules leurs caractéristiques. L'édition dans une ligne vierge permet l'ajout d'un nouveau type de véhicules.

- capa. : Nombre de positions pouvant être servies par ce type de véhicule.
- km : Distance pouvant être parcourue dans une tournée par ce type de véhicule. Un véhicule n'effectue qu'une tournée par jour.
- min : Durée maximale d'une tournée (autonomie en temps) pour un véhicule de ce type.

- durée : Durée maximale d'une tournée liée aux conventions des chauffeurs, pour un véhicule de ce type.
- fixe : Coût d'achat d'un véhicule de ce type.
- var : Coût lié à la distance parcourue pour un véhicule de ce type. Par exemple, coût kilométrique.
- poll. : Pollution liée à la distance parcourue par un véhicule de ce type. Cela peut représenter les émissions en gaz à effet de serre ou bien également tenir compte d'autres émissions nuisibles. C'est alors à l'utilisateur de définir une valeur globale à ces différents critères.
- cong. : Congestion du trafic liée au nombre de positions servies par les véhicules de ce type.
- accep. : Acceptabilité de la présence d'un véhicule de ce type. Le coût lié à ce paramètre ne dépend pas des tournées effectuées par les véhicules.

La colonne modèle indique si le type de véhicules doit être pris en compte ou non dans le modèle d'optimisation. La valeur de cette dernière colonne peut également être changée au moment de l'appel au moteur d'optimisation (voir Menu Calcul).

#### **Sous-menu Société**

Affiche les entreprises de messageries considérées. L'édition dans une ligne vierge permet l'ajout d'une nouvelle société.

Dans la version actuelle, l'ensemble des sociétés est géré comme une seule par l'application.

#### **Sous-menu Distance**

Affiche les distances des plateformes aux zones de demande.

#### **Sous-menu Durée**

Affiche les durées des plateformes aux zones de demande selon le type de véhicule.

#### **Sous-menu Durée de Service**

Affiche les durées de service des zones de demande selon le type de véhicule.

#### **Sous-menu Demande**

Affiche les nombres de position à servir par zone de demande selon le messenger.

#### **Sous-menu Interdit**

Indique les zones de demande interdites d'accès, pour chaque type de véhicule.

#### **Sous-menu Compatibilité**

Indique les zones de demande pouvant être servies au cours d'une même tournée.

### **5.3 Menu Vue**

Ce menu permet de basculer de l'affichage en mode `tout` (tous les éléments sont affichés dans leur propre couleur) au mode `sélection`, où seuls les éléments sélectionnés dans la solution proposée sont affichés à la couleur de leur plateforme d'affectation.

## 5.4 Menu Calcul

Ce menu permet d'accéder à l'unique sous-menu Solution, qui ouvre une fenêtre dédiée à l'appel du moteur d'optimisation et au calcul d'une nouvelle solution (figure 27).

**Sélection de variables**

nom de la solution (changer crée une nouvelle instance)  
marsarrondi

**Plateforme**

nom	disponible	forcé
pennes	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
cuques	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
arenc	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
aubagne	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
caillols	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Véhicule**

nom	disponible
P_elec	<input checked="" type="checkbox"/>
P_ther	<input checked="" type="checkbox"/>
M_elec	<input checked="" type="checkbox"/>
M_ther	<input checked="" type="checkbox"/>
mega	<input type="checkbox"/>
G_ther	<input checked="" type="checkbox"/>

**Fonction objectif**

pondération de l'impact économique  
0 50 100

pondération de l'impact environnemental  
0 50 100

pondération de l'impact sociétal  
0 50 100

Durée d'exploitation (en jours)  
3000

Calculer nouvelle solution

Fermer

Figure 28 : interface pour l'appel au moteur d'optimisation

Cette fenêtre est composée des différentes zones suivantes.

- Nom de la solution : permet à l'utilisateur de spécifier le nom de la solution calculée. Un nom identique à la solution ouverte (par défaut), écrase définitivement la solution courante (la solution calculée est automatiquement enregistrée). Un nouveau nom permet la création d'une nouvelle solution et de conserver intacte la solution courante. Une nouvelle fenêtre de solution sera ouverte pour la nouvelle solution.
- Plateforme : permet à l'utilisateur d'indiquer, pour chaque plateforme, si celle-ci est sélectionnable ('disponible') dans la solution calculée ou bien de forcer ('forcé') son ouverture.
- Véhicule : Permet d'indiquer, pour chaque type de véhicule, si celui-ci est disponible ('disponible') dans la solution calculée.

- **Fonction objectif** : Permet de choisir le poids de chaque critère dans l'évaluation de la solution calculée (à noter qu'il ne s'agit pas de pourcentage bien que l'échelle soit de 0 à 100).
- **Durée d'exploitation** : Donne l'horizon sur lequel la solution est calculée. Les coûts variables associés aux tournées journalières seront multipliés par ce facteur.

Le bouton 'Calculer nouvelle solution' permet alors de lancer le moteur d'optimisation avec les paramètres sélectionnés.

Le bouton reste en mode affichage enfoncé pour toute la durée du calcul.

## **5.5 Menu Admin**

### **Sous-menu Langage**

Ce menu permet de changer la langue de l'interface.

### **Sous-menu Quitter**

Quitte l'application.

# ETUDE SUR LA VILLE DE MARSEILLE : DESCRIPTION DES DONNEES

Ce document décrit les données utilisées pour les expérimentations réalisées en s'appuyant sur le cas de la ville de Marseille. Malgré nos sollicitations, les données n'ont pu être validées par les collectivités locales. Ces données ont été construites en essayant de respecter au mieux des ordres de grandeur connus et tenant de maintenir au mieux une cohérence interne.

Les données sont détaillées en suivant le plan suivant :

- données associées aux secteurs
- données associées aux plateformes
- données associées aux véhicules
- données additionnelles associées aux distances et durées

## 1. Secteurs

La ville est découpée en 18 secteurs :

- 16 secteurs calqués sur les 16 arrondissements de Marseille
- Aubagne (en violet, à l'ouest)
- Plan-de-Cuques (en vert, au nord-est)

Les figures 1 et 2 présentent respectivement le découpage réel de la ville de Marseille en arrondissements et la représentation faite dans le simulateur.

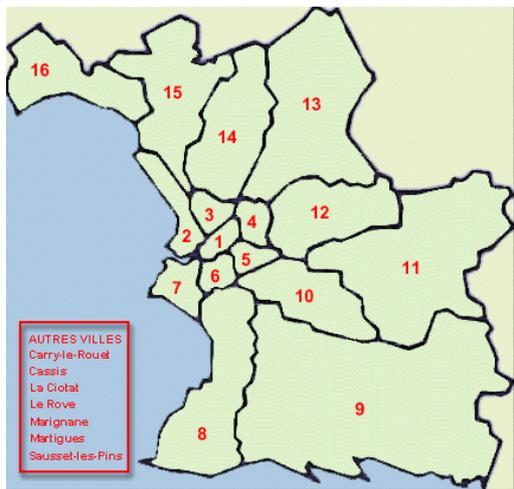


Figure 29: Arrondissements de Marseille

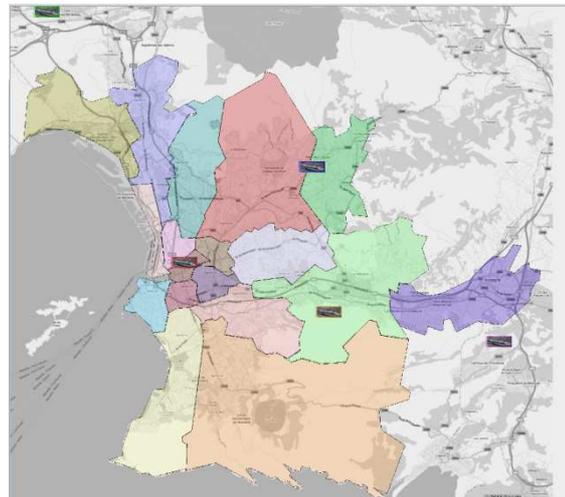


Figure 30: Secteurs

Les secteurs sont de type multi-véhicules, à l'exception de deux secteurs : le 16<sup>ème</sup> arrondissement et Aubagne (secteurs mono-véhicules). Rappelons que le service d'un secteur multi-véhicule peut être réalisé à l'aide de plusieurs véhicules, et que ce service ne peut être mutualisé avec le service d'un secteur voisin. A contrario, le service d'un secteur mono-véhicule doit entièrement être réalisé par un unique véhicule, avec la possibilité de continuer la tournée dans un ou plusieurs autres secteurs (mono-véhicules).

Les tableaux 1 à 3 présentent de manière détaillée les données associées aux 18 secteurs. La colonne Demande indique le nombre de positions à satisfaire dans le secteur, la colonne Distance indique la distance à parcourir à l'intérieur du secteur pour couvrir l'ensemble des positions, la colonne Congestion donne le facteur de congestion du secteur (A : congestion faible).

	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Demande</b>	300	300	300	300	300	200	200	200
<b>Distance</b>	7	7	7	7	7	7	7	15
<b>Congestion</b>	A	A	A	A	A	A	A	A

Tableau 1 : données secteurs détaillées (arrondissements 1 à 8)

	9	10	11	12	13	14	15	Plan-de-Cuques
<b>Demande</b>	200	200	100	100	100	100	100	0
<b>Distance</b>	40	10	30	15	40	15	15	15
<b>Congestion</b>	A	A	A	A	A	A	A	B

Tableau 2 : données secteurs détaillées (arrondissements 9 à 15 + Plan-de-Cuques)

	16	Aubagne
<b>Demande</b>	9	10
<b>Distance</b>	15	15
<b>Congestion</b>	A	B

Tableau 3 : données secteurs détaillées (secteurs mono-véhicules)

Le nombre de positions à couvrir dans les secteurs multi-véhicules varie de 100 à 300, avec une moyenne de 200. La distance à parcourir pour la couverture d'un secteur varie de 7 à 40 km, avec une moyenne de 15 km. Le facteur de congestion est de A pour l'ensemble des secteurs, excepté Aubagne et Plan-de-Cuques pour lesquels le facteur est B.

Les durées de service ne sont pas indiquées ici car dépendantes du type de véhicule. Ces données sont présentées dans la section Distances et durées.

## 2. Plateformes

5 sites sont proposés pour accueillir des plateformes logistiques. Ces sites sont présentés sur la figure 3 ci-dessous :

- Arenc : en cœur du centre-ville (rouge)
- Aubagne : à l'est (violet)
- Caillols : dans le 11<sup>ème</sup> arrondissement (jaune)
- Cuques : au nord-est (bleu)
- Pennes : au nord-ouest (vert)

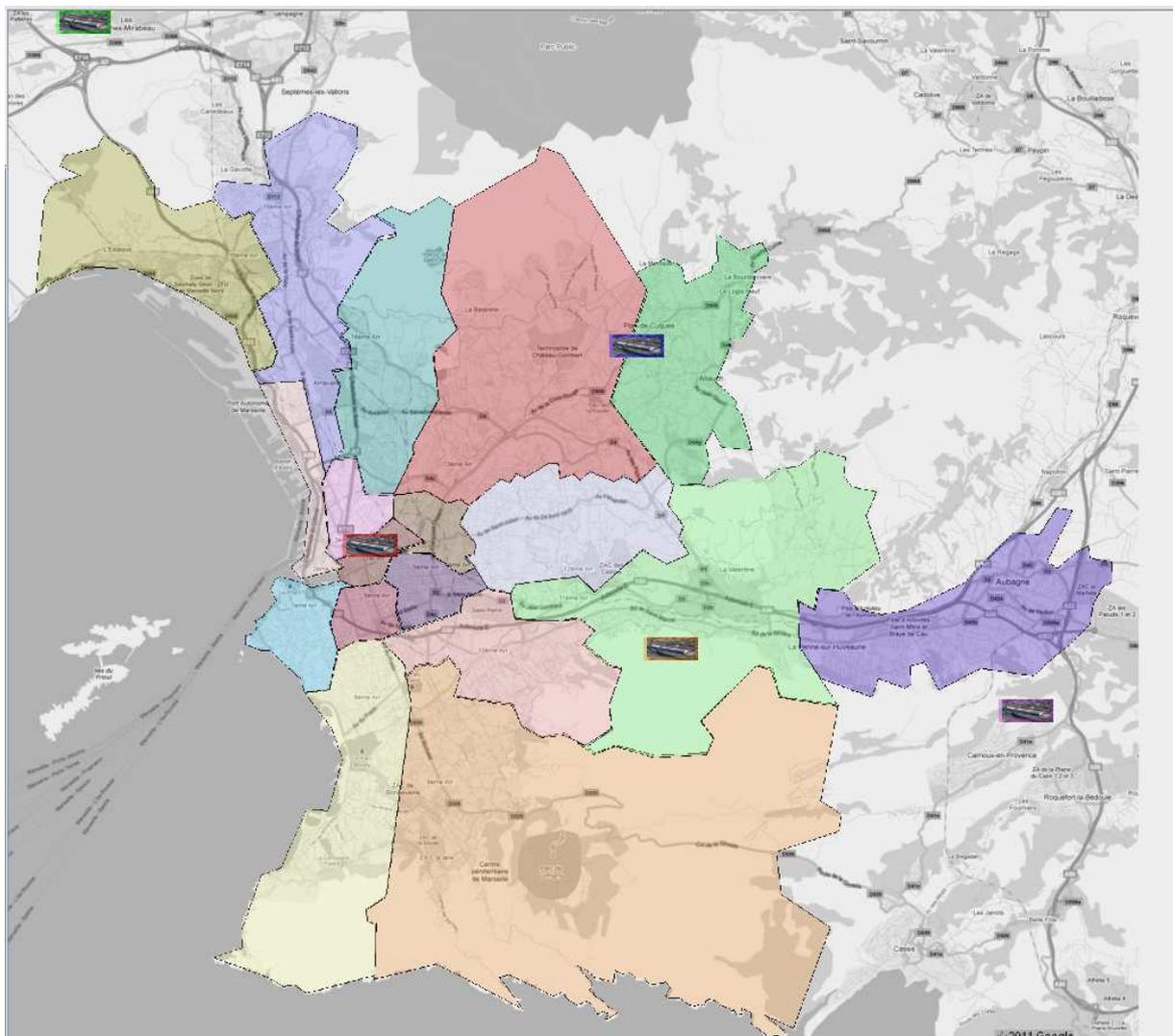


Figure 31: sites envisagés pour les plateformes

Les données associées aux différents sites sont décrites dans le tableau 4. Indépendamment du site, une constante de 50 positions pouvant être servies par quai est définie, permettant ainsi de faire le lien entre le nombre de quai ouverts sur un site et le nombre de positions pouvant être couvertes à partir de ce site.

	Nombre maximal de quais	Coût fixe d'implantation (en millions d'euros)	Coefficient d'acceptabilité	Coût par quai (en millions d'euros)	Coefficient de pollution
<b>Arenc</b>	15	25	C	0,3	A
<b>Aubagne</b>	40	20	A	0,25	B
<b>Caillols</b>	20	30	B	0,3	A
<b>Cuques</b>	30	30	B	0,3	C
<b>Pennes</b>	70	20	A	0,25	D

Tableau 4 : données détaillées pour les sites envisagés

Deux sites, Pennes et Aubagne, sont envisagés à l'extérieur de la ville, ce qui se traduit par un potentiel supérieur en nombre de quais. En particulier, la capacité maximale de Pennes est définie comme étant suffisante pour couvrir l'ensemble des besoins de la ville. Egalement, l'acceptabilité est meilleure pour ces deux localisations et le coût fixe d'implantation nettement inférieur. A contrario, Arenc et Caillols sont considérées plus avancées du point de vue environnemental, avec un coefficient de pollution plus faible.

### 3. Véhicules

5 catégories de véhicules sont définies :

- 3 types de véhicules thermiques, de différentes capacités
- 2 types de véhicules électriques, de différentes capacités

Les caractéristiques de ces types de véhicules sont présentées dans les tableaux 5 et 6, où *ther* qualifie des véhicules thermiques, *elec* des véhicules électriques et les initiales *G*, *M* et *P* identifient des gros, moyens ou petits véhicules, respectivement.

	Capacité (en positions)	Autonomie (en km)	Autonomie (en minutes)	Durée maximale des tournées (en minutes)
<b>G_ther</b>	60	600	1000	480
<b>M_elec</b>	40	100	240	480
<b>M_ther</b>	40	600	1000	480
<b>P_elec</b>	20	100	240	480
<b>P_ther</b>	20	600	1000	480

Tableau 5 : données détaillées types de véhicules

	Coût achat (en k euros)	Coût au km	Pollution au km	Coefficient de congestion	Coefficient d'acceptabilité
<b>G_ther</b>	50	0,4	500	E	E
<b>M_elec</b>	50	0,035	2	B	B
<b>M_ther</b>	30	0,25	350	C	D
<b>P_elec</b>	30	0,035	1	A	A
<b>P_ther</b>	20	0,18	200	A	C

Tableau 6 : données détaillées types de véhicules (suite)

L'autonomie des véhicules électriques est supposée de 100 km et 240 minutes. Pour les véhicules thermiques, des valeurs arbitrairement élevée sont définies, la seule limitation relevant de la durée maximale des tournées imposée par l'organisation de la collecte/distribution (480 minutes). Les coefficients de congestion et d'acceptabilité sont en faveur de manière couplée des véhicules électriques et des véhicules de petit gabarit. Le coût d'utilisation des véhicules électriques est considéré comme quasi nul. Le coût d'achat au contraire favorise les thermiques.

Aucune interdiction particulière n'est considérée : tous les types de véhicules ont accès à tous les secteurs.

## 4. Distances et durées

### 4.1 Distances d'approche

Les distances entre sites identifiés pour l'accueil de plateformes et secteurs ont été évaluées à l'aide de requêtes Google Maps. Les valeurs obtenues possèdent les caractéristiques indiquées dans le tableau 7 ci-dessous.

	Moyenne (en km)	Min (en km)	Max (en km)
<b>Arenc</b>	6,0	0	15,5
<b>Aubagne</b>	24,3	13,6	34,1
<b>Caillols</b>	12,4	1,4	21,9
<b>Cuques</b>	11,0	4,7	21,6
<b>Pennes</b>	20,0	13,2	33

Tableau 7 : statistiques sur les distances site - secteur

Ces statistiques mettent bien en évidence le caractère extra-urbain des deux localisations Pennes et Aubagne, ainsi que la position d'Arenc en cœur de ville, avec des distances d'approche pouvant varier d'un facteur 3 en moyenne entre Pennes et Arcenc.

## 4.2 Temps d'approche

A partir de ces matrices de distance ont pu être définies des temps d'approche. Ces temps sont obtenus de la manière suivante :

- pour les véhicules de petite dimension, une vitesse moyenne d'environ 60km/h est considérée (rappelons qu'il s'agit de temps d'approche) ; en d'autres termes, la valeur retenue pour la durée est du même ordre de grandeur que la distance (un aléa est malgré tout introduit pour découpler les valeurs et pour éviter des durées trop proches de zéro) ;
- pour les véhicules de moyenne dimension, un facteur multiplicatif 1,2 est appliqué par rapport aux petits véhicules ;
- pour les plus gros véhicules, le facteur multiplicatif est de 1,6.

## 4.3 Durées de service

Les durées de service par secteur sont principalement reliées au nombre de positions à servir dans le secteur. Les durées de service sont également fonctions de la taille du véhicule :

- pour les petits véhicules, la durée de service de l'ensemble du secteur en minutes est égale au nombre de positions du secteur (rappelons que le temps de service compté pour un véhicule ne servant que partiellement un secteur est proportionnel au pourcentage de positions servies) ; ainsi, les temps de service varient de 100 à 300 pour les zones multi-véhicules ;
- pour les véhicules de taille moyenne, un temps de 20 minutes est ajouté ;
- pour les grands véhicules 40 minutes sont ajoutées.

# APPROCHE METHODOLOGIQUE

## POUR EXPLOITATION DU LOGICIEL PLUME

Dans ce document nous détaillons la méthodologie proposée pour mener une étude à l'aide de l'outil d'aide à la décision PLUME. Une illustration de la méthodologie est déroulée en fin de document.

Rappelons que l'utilisateur du logiciel peut être une collectivité locale (municipalité, communauté de communes, agence d'urbanisme) ou un opérateur (messagers, opérateurs logistiques).

### 1. Paramétrer les outils

Le logiciel PLUME s'appuie sur l'analyse des performances de 3 outils (Moyens) :

- Les secteurs à desservir
- Les Terrains/plateformes à exploiter
- Les véhicules à utiliser

Chacun de ces outils sont à paramétrer en préambule suivant le cadre suivant :

#### Secteurs à desservir

Paramètres	Collectivité	Opérateur
Type (mono-véhicule ou multi-véhicules)	<i>Choix politique de la collectivité</i>	<i>Choix politique de la collectivité ou choix de l'opérateur</i>
Demande	<i>Réalité de la demande</i>	<i>Analyse de marché</i>
Longueur de la tournée à l'intérieur du secteur	<i>Fonction de la demande = donnée arithmétique</i>	<i>Fonction de la demande = donnée arithmétique</i>
Congestion	<i>Constat</i>	<i>Constat</i>
Compatibilité	<i>Analyse géo-économique des secteurs</i>	<i>Analyse géo-économique des secteurs</i>
Interdiction	<i>Choix politique de la collectivité</i>	<i>Choix politique de la collectivité</i>

#### Terrains/plateformes à exploiter

Paramètres	Collectivité	Opérateur
Superficie actuelle	<i>Disponibilité</i>	<i>Disponibilité</i>
Superficie maximale	<i>Opportunité Politique</i>	<i>Opportunité Economique</i>
Nombre de positions par quai	<i>Paramétré sur superficie</i>	<i>Paramétré sur superficie</i>
Coût fixe	<i>Fonction de l'impact économique sur la politique foncière de la collectivité</i>	<i>Coûts d'acquisition et de construction si propriétaire</i>
Coût variable	<i>Non concerné directement</i>	<i>Coût d'exploitation</i>
Acceptabilité	<i>Analyse sociologique</i>	<i>Liée à l'analyse sociologique de la collectivité</i>
Pollution	<i>Exigence politique de la collectivité</i>	<i>Liée à l'offre = bilan pollution</i>

## Véhicules à utiliser

Paramètres	Collectivité	Opérateur
Capacité	<i>Fonction du véhicule(volume)</i>	<i>Fonction du véhicule(volume)</i>
Autonomie en distance	<i>Paramètre constructeur</i>	<i>Paramètre constructeur</i>
Autonomie temps	<i>Paramètre constructeur</i>	<i>Paramètre constructeur</i>
Autonomie organisationnelle	<i>Définie par l'opérateur</i>	<i>Définie par l'opérateur</i>
Coût fixe	<i>Lié au véhicule</i>	<i>Lié au véhicule</i>
Coût fonctionnement	<i>Lié au véhicule</i>	<i>Lié au véhicule</i>
Emission de polluants	<i>Paramètre constructeur</i>	<i>Paramètre constructeur</i>

## 2. Paramétrer les coefficients

Le logiciel PLUME permet de rechercher la meilleure organisation en fonction des 3 piliers du Développement Durable. Dans PLUME défini par :

- Coefficient Economique
- Coefficient Environnemental
- Coefficient Sociétal

Chacun de ces coefficients est défini par des paramètres qui sont caractérisés par l'exploitant avant l'utilisation du logiciel PLUME :

### Coefficient Economique

- minimisation des coûts fixes pour les plateformes
- minimisation des coûts variables pour les plateformes
- minimisation des coûts fixes pour les véhicules utilisés
- minimisation des coûts variables pour les véhicules utilisés

### Coefficient Environnemental

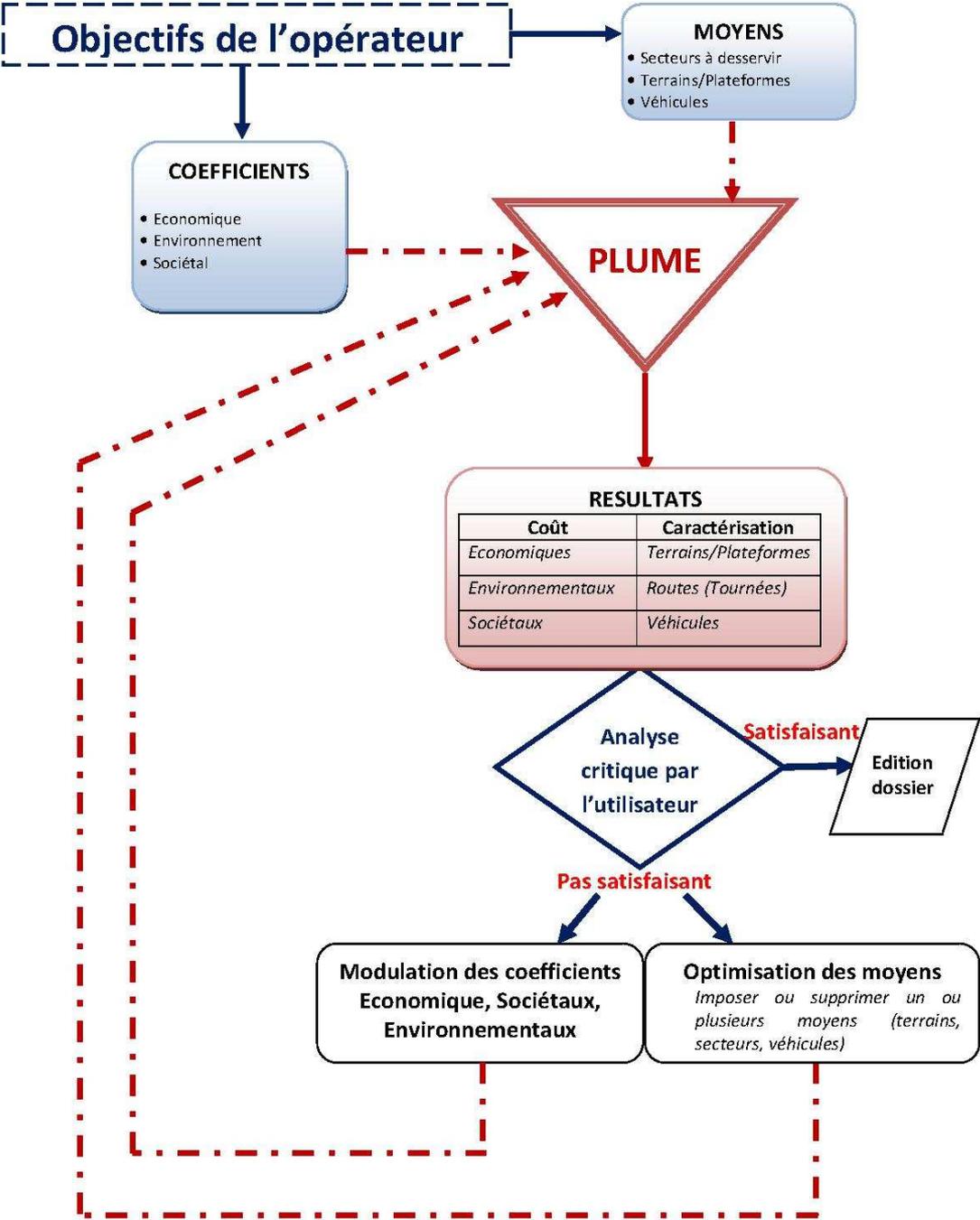
- minimisation des émissions de polluants des véhicules utilisés
- minimisation de la pollution induite par les plateformes,
- minimisation de la congestion provoquée par les véhicules utilisés

### Coefficient Sociétal

- maximisation de l'acceptabilité des terrains sélectionnés
- pour les plateformes et des véhicules utilisés.

Ils sont paramétrés sous forme de pondération d'une échelle de 0 (non pris en compte) à 100 (primordial)

### 3. Exploiter le logiciel PLUME en tant qu'OPERATEUR



L'opérateur traduit dans le logiciel PLUME ses objectifs et les moyens qu'il se donne :

- Coefficient Economique (modulation sur une échelle de 0 à 100) ;
- Coefficient Environnemental (modulation sur une échelle de 0 à 100) ;
- Coefficient Sociétal (modulation sur une échelle de 0 à 100) ;
- Quels secteurs à desservir ? – A choisir sur l'ensemble des secteurs paramétrés ;
- Quels terrains/plateformes à exploiter ? - A choisir sur l'ensemble des terrains disponibles et déjà paramétrés dans le logiciel ;
- Quels véhicules à utiliser ? - A choisir sur l'ensemble des véhicules disponibles et déjà paramétrés dans le logiciel.

Le logiciel PLUME génère une proposition caractérisée par des réponses en termes de :

- « coûts » économique, environnemental, sociétal,
- terrains/plateformes à exploiter en précisant leurs dimensionnements,
- routes traduisant les organisations des tournées à mettre en œuvre pour répondre au besoin avec précision de la plateforme de départ, le véhicule à utiliser, le ou les secteurs traités par chaque tournée,
- véhicules à utiliser en précisant leur taux d'utilisation.

L'utilisateur traite les informations fournies (coûts et moyens à mettre en œuvre) et les critiques en fonction de ses objectifs.

Si les réponses organisationnelles et structurelles satisfont l'attente, il ne reste qu'à imprimer la totalité des éléments paramétrés et des réponses apportées par le logiciel.

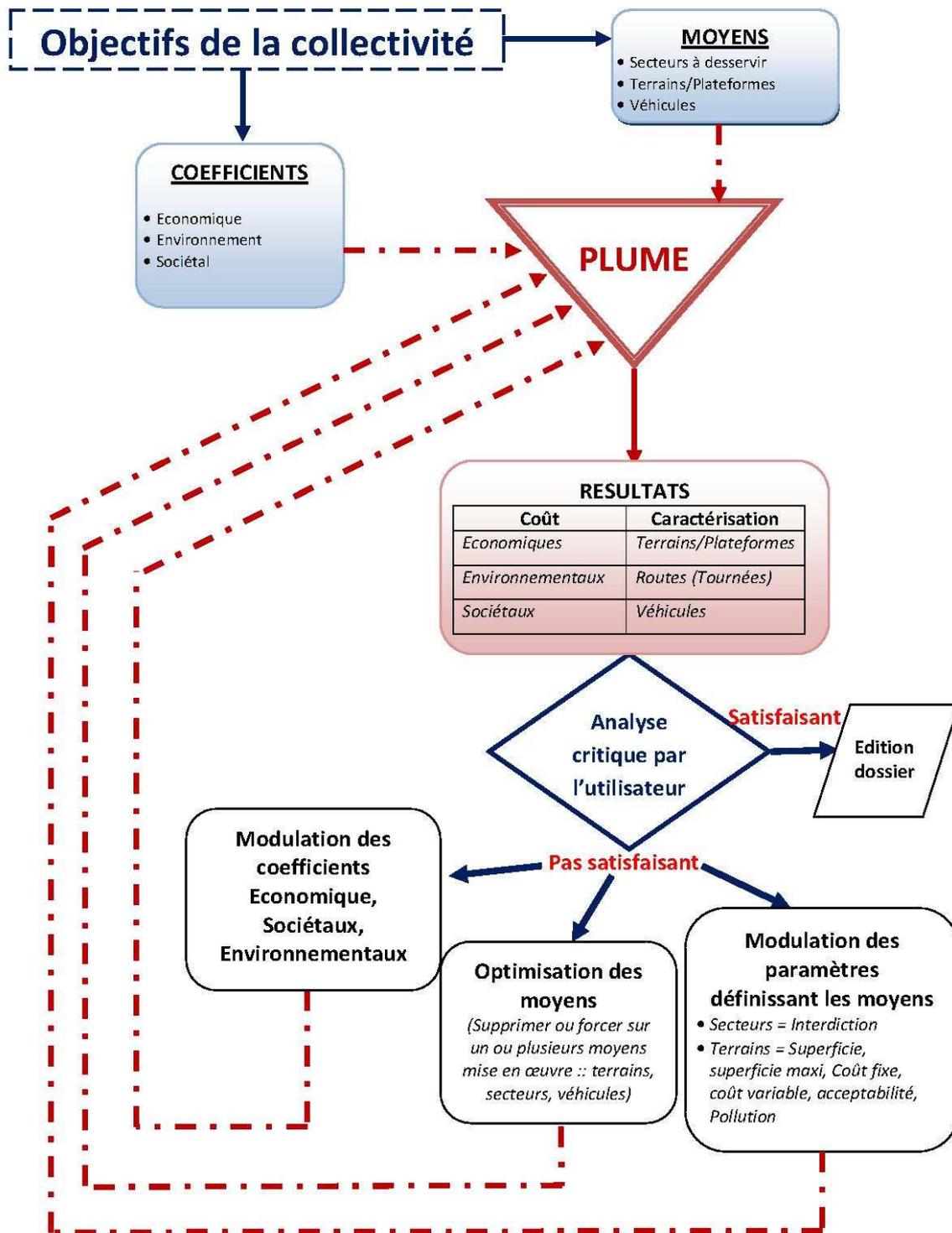
Si les réponses organisationnelles et structurelles ne répondent pas au besoin, l'utilisateur peut :

1. Moduler les coefficients pour renforcer un des 3 axes (économique, environnemental, sociétal)
2. Supprimer ou forcer un des moyens mis en œuvre : par exemple en décidant de ne plus desservir un secteur, en demandant qu'une plateforme soit exploitée (si elle n'a pas été traitée par le logiciel) ou en la supprimant ; en forçant ou supprimant un ou des véhicules pour recentrer sur un modèle.

Le logiciel PLUME est lancé de nouveau, et fournit une nouvelle proposition que l'utilisateur critiquera avec la même démarche précisée ci-dessus.

Le logiciel PLUME peut-être lancé autant de fois que nécessaire pour affiner par itération une proposition, ou pour donner des comparatifs entre 2 variantes, notamment sur les coûts (*par exemple : avec et sans véhicule électrique, tous les autres moyens et coefficients restant identiques : quelles différences de coûts entre la variante « avec véhicule électrique » et la variante « sans véhicule électrique » ?*)

#### 4. Exploiter le logiciel PLUME en tant que COLLECTIVITE



La collectivité traduit dans le logiciel PLUME ses objectifs et les moyens qu'il se donne :

- Coefficient Economique (modulation sur une échelle de 0 à 100) ;
- Coefficient Environnemental (modulation sur une échelle de 0 à 100) ;
- Coefficient Sociétal (modulation sur une échelle de 0 à 100) ;
- Quels secteurs à desservir ? – A choisir sur l'ensemble des secteurs paramétrés. A priori, la notion de service public oblige à la prise en compte de l'ensemble des secteurs de la collectivité ;
- Quels terrains/plateformes à exploiter ? - A choisir sur l'ensemble des terrains disponibles et déjà paramétrés dans le logiciel ;
- Quels véhicules à utiliser ? - A choisir sur l'ensemble des véhicules disponibles et déjà paramétrés dans le logiciel.

Le logiciel PLUME génère une proposition caractérisée par des réponses en termes de :

- « coûts » économique, environnemental, sociétal,
- terrains/plateformes à exploiter en précisant leurs dimensionnements,
- routes traduisant les organisations des tournées à mettre en œuvre pour répondre au besoin avec précision de la plateforme de départ, le véhicule à utiliser, le ou les secteurs traités par chaque tournée,
- véhicules à utiliser en précisant leur taux d'utilisation.

L'utilisateur traite les informations fournies (coûts et moyens à mettre en œuvre) et les critiques en fonction de ses objectifs.

Si les réponses organisationnelles et structurelles satisfont l'attente, il ne reste qu'à imprimer la totalité des éléments paramétrés et des réponses apportées par le logiciel. Si les réponses organisationnelles et structurelles ne répondent pas au besoin, l'utilisateur-collectivité peut :

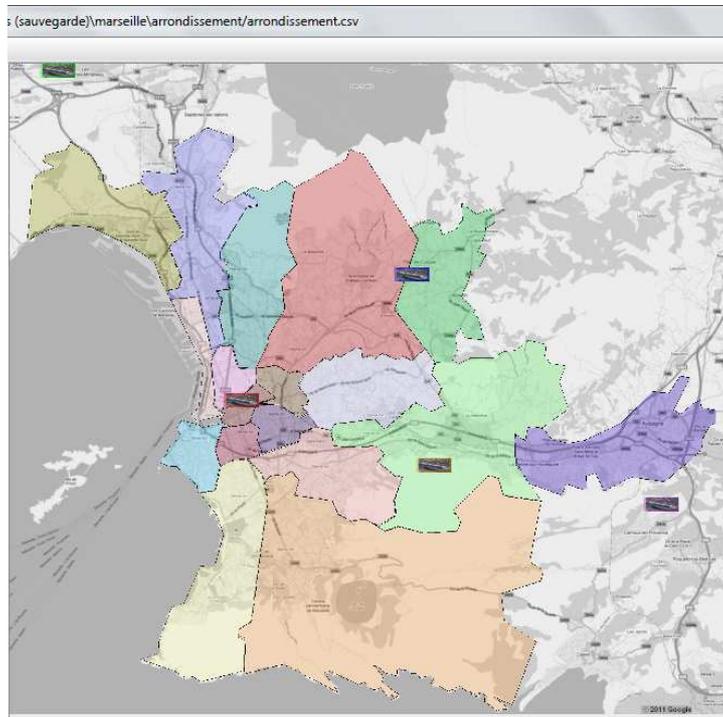
1. Moduler les coefficients pour renforcer un des 3 axes (économique, environnemental, sociétal) ;
2. Modifier les paramètres qui incombent à son champ d'intervention en tant que collectivité. Ces paramètres sont :
  - Une interdiction d'accès à un secteur pour certains véhicules ;
  - Une modulation de la mise à disposition de foncier pour la plateforme (surface maximale) ;
  - Une modulation du coût fixe généré par la plateforme ;
  - Une modulation du niveau d'acceptabilité prêt à être pris en compte pour l'implantation de la plateforme ;
  - Une modulation du niveau de pollution toléré quant à l'implantation de la plateforme.
3. Supprimer ou forcer un des moyens mis en œuvre : par exemple en décidant de ne plus desservir un secteur (*à priori peu probable, la collectivité doit maintenir une notion de service public*), en demandant qu'une plateforme soit exploitée (*si elle n'a pas été traitée par le logiciel*) ou en la supprimant ; en forçant ou supprimant un ou des véhicules pour répondre (*notamment entre électrique/thermique et petit/moyen/gros*).

Le logiciel PLUME est lancé de nouveau, et fournit une nouvelle proposition que l'utilisateur critiquera avec la même démarche précisée ci-dessus.

Le logiciel PLUME peut-être lancé autant de fois que nécessaire pour affiner par itération une proposition, ou pour donner des comparatifs entre 2 variantes, notamment sur les coûts (par exemple : avec et sans véhicule électrique, tous les autres moyens et coefficients restant identiques : quelles différences de coûts entre la variante « avec véhicule électrique » et la variante « sans véhicule électrique » ?).

## 5. Exemple de simulation – Exploitation PLUME par un opérateur.

**Etat de démarrage.** Tous les secteurs sont délimités, et les plateformes existantes sont placées comme présentés dans la diapo suivante :



**Etape 1.** Déterminer la pondération des coefficients et moyens mis en œuvre (*ici la plateforme d'Aubagne n'est pas prise en compte ; tous les véhicules sont potentiellement utilisables ; le coefficient économique est placé à 80/100, le coefficient environnemental à 50/100, ainsi que le coefficient sociétal*)

Sélection de variables

Nom de la solution (changer crée une nouvelle instance)

arrondissement

Plateforme		
nom	disponible	forcé
pennes	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
cuques	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
arenc	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
aubagne	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
caillols	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Véhicule	
nom	disponible
P_elec	<input checked="" type="checkbox"/>
P_ther	<input checked="" type="checkbox"/>
M_ther	<input checked="" type="checkbox"/>
M_elec	<input checked="" type="checkbox"/>
G_ther	<input checked="" type="checkbox"/>

Fonction objectif

pondération de l'impact économique (80)

0 50 100

pondération de l'impact environnemental (50)

0 50 100

pondération de l'impact sociétal (50)

0 50 100

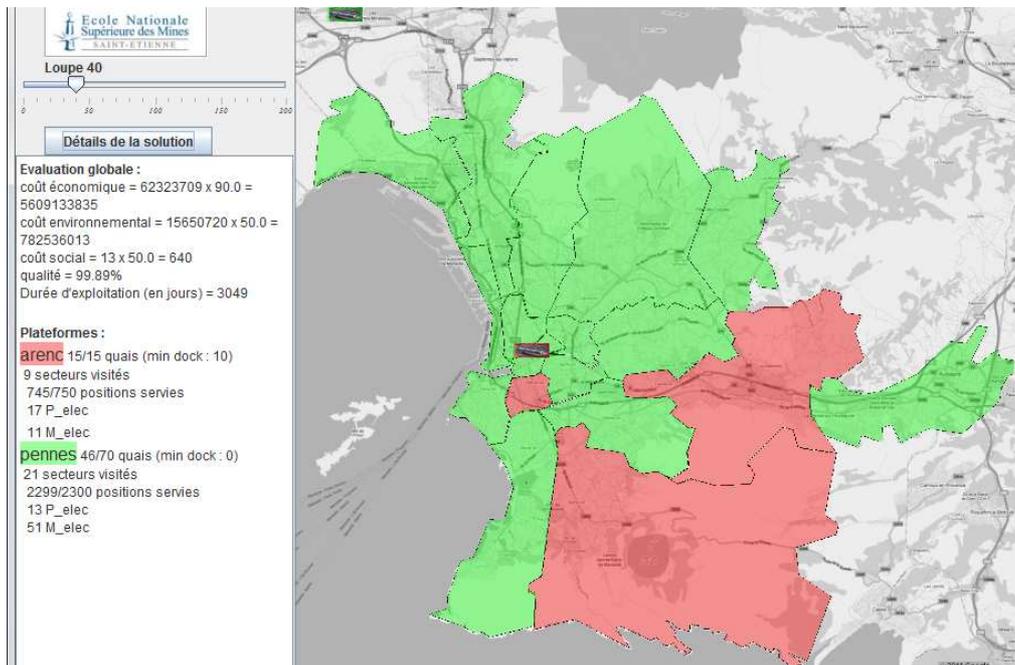
Durée d'exploitation (en jours)

3049

Calculer nouvelle solution

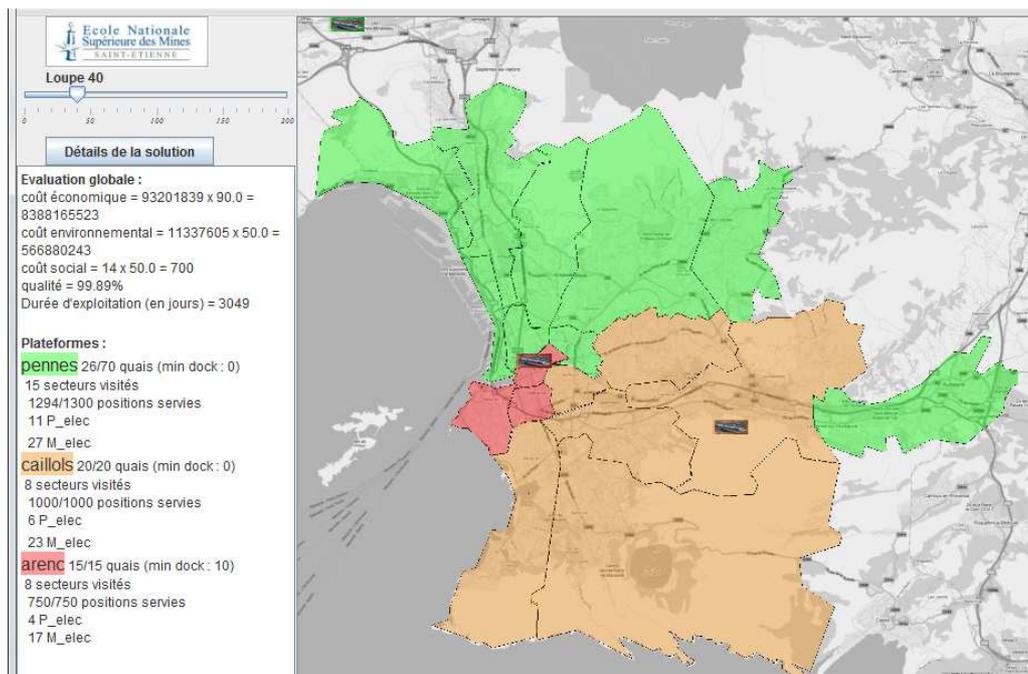
Fermer

## Etape 2. Le calculateur de PLUME est lancé – Résultats



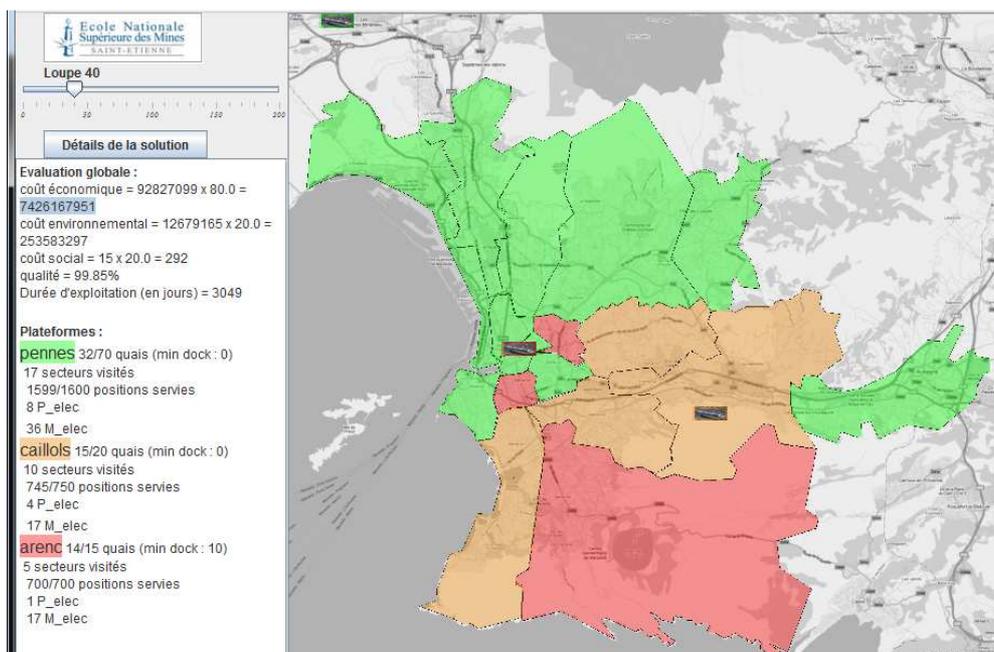
Seulement 2 plateformes retenues (Arenc et Pennes), couvrant l'ensemble des secteurs en tournant quasiment à pleine capacité (seules 6 positions supplémentaires pourraient être desservies), s'appuyant sur 30 tournées en Véhicules Petit Electrique et 62 tournées en véhicules Moyen Electrique, avec un « coût » économique de 5 609 133 835 unités.

## Etape 3. La critique par l'opérateur peut estimer que la plateforme des Caillols doit être forcée. Nouveau test PLUME



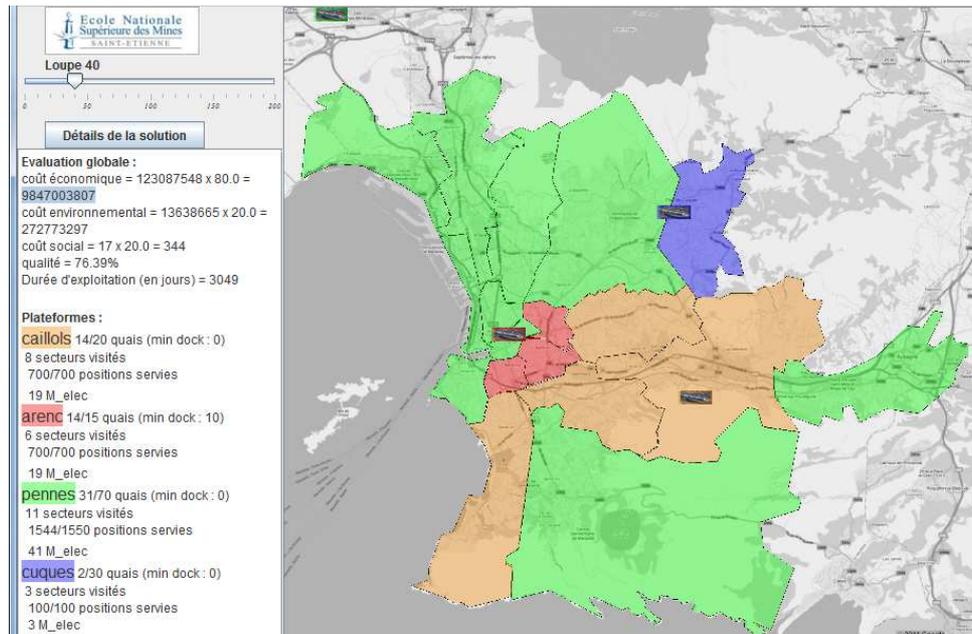
3 plateformes retenues (Arenc et Pennes + Caillols « forcée »), couvrant l'ensemble des secteurs et tournant de nouveau quasiment à pleine capacité, s'appuyant sur 21 tournées en Véhicules Petit Electrique et 67 tournées en véhicules Moyen Electrique, avec un « coût » économique de 8 388 165 523 unités soit un surcoût de plus de 40%.

**Etape 4.** La critique par l'opérateur portera sur le surcoût, le coefficient économique maintenu à 80/100 et les 2 autres coefficients sont pondérés à 20/100.



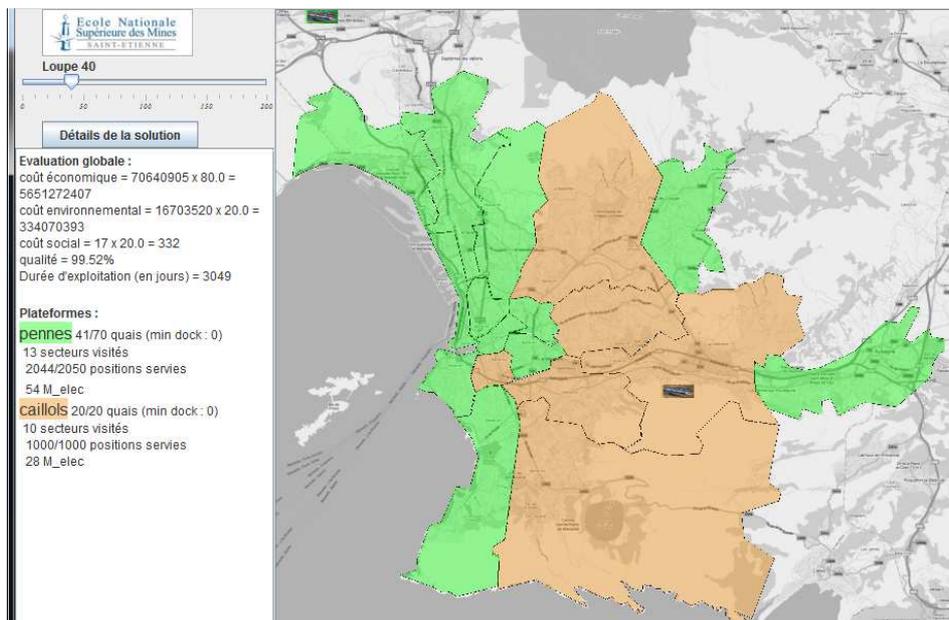
Toujours 3 plateformes retenues (Arenc et Pennes + Caillols « forcée »), couvrant l'ensemble des secteurs mais avec une distribution réorganisée afin de limiter les coûts : 13 tournées en Véhicules Petit Electrique, 70 tournées en véhicules Moyen Electrique, avec un « coût » économique de 7 426 167 951 unités soit une baisse d'environ 10%.

**Etape 5.** L'opérateur souhaitera avoir une flotte de véhicules homogènes, en conservant des modèles uniquement Moyen Electrique.



3 plateformes (Arenc et Pennes + Caillols « forcée »), couvrant l'ensemble des secteurs et s'appuyant sur 82 tournées en véhicules Moyen Electrique, avec un « coût » économique de 9 847 003 807 unités soit un surcoût de 20% par rapport au test précédent.

**Etape 6.** L'opérateur souhaitera réduire son nombre de plateformes (Pennes et Caillols) avec une flotte de véhicules homogènes, en conservant des modèles uniquement Moyen Electrique.



2 plateformes (Pennes et Caillols), couvrant l'ensemble des secteurs et s'appuyant sur 82 tournées en véhicules Moyen Electrique, avec un « coût » économique de 5 651 272 407 unités soit la meilleure réponse économique. L'utilisateur peut estimer qu'il a sa réponse optimale.