



**HAL**  
open science

## Le projet AGREGA : vers un outil pédagogique et ludique pour simuler le marché des granulats en région Île-de-France

Jacques Schleifer, Bruno Tessier, Isabelle Thenevin, Carole Deneuve, Christine Mallens, Laurent Goethals

### ► To cite this version:

Jacques Schleifer, Bruno Tessier, Isabelle Thenevin, Carole Deneuve, Christine Mallens, et al.. Le projet AGREGA : vers un outil pédagogique et ludique pour simuler le marché des granulats en région Île-de-France. *Annales des mines - Série Responsabilité et environnement*, 2019, N° 96 - Octobre 2019 - La pollution de l'air, 96, pp.107-119. 10.3917/re1.096.0107 . hal-02307024

**HAL Id: hal-02307024**

**<https://minesparis-psl.hal.science/hal-02307024>**

Submitted on 7 Oct 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

# Le projet AGREGA : vers un outil pédagogique et ludique pour simuler le marché des granulats en région Île-de-France <sup>(1)</sup>

Par Jacques SCHLEIFER, Bruno TESSIER et Isabelle THÉNEVIN

Centre de Géosciences, MINES ParisTech, PSL Université

Carole DENEUVE et Christine MALLENS

UNICEM

et Laurent GOETHALS

Andreil Game

Le Grand Paris, avec ses voies ferrées, ses logements et ses réseaux va impacter largement le marché déjà tendu des granulats en Île-de-France. Afin d'atténuer ce stress, les acteurs de ce marché ont été mobilisés autour d'un projet de recherche partenariale nommé AGREGA, subventionné par l'ANR (Agence nationale de recherche). Ce projet a permis de réaliser un outil de visualisation des flux de granulats. Cet outil informatique est équipé d'un solveur mathématique afin de faire correspondre l'offre à la demande dans de multiples configurations. Cette partie du travail a été confiée au Centre de Géosciences de Mines ParisTech. L'outil est doté d'une base de données actualisée et réaliste fournie par l'UNICEM et d'une interface simple à appréhender conçue par Andreil Game et inspirée des jeux vidéo. Dans cet article, l'outil est décrit de manière complète, les données d'entrée et de sortie, ainsi que la méthode de résolution du marché. Enfin, la présentation de quelques résultats pour l'année de base et l'année 2024 montre l'intérêt sociétal de cette démarche. Cela pourrait peut-être permettre d'envisager une stratégie de gestion des ressources pour répondre aux besoins qualitatifs et quantitatifs en matériaux, tout en limitant les tonnages transportés et, par voie de conséquence, les impacts environnementaux.

## Introduction

La résolution d'un marché est un équilibre à trouver entre l'offre et la demande d'un matériau. Cet équilibre peut être conditionné par un paramètre comme le prix d'achat ou les coûts de transport, individuels ou globaux. La compétitivité des sources de production existe dans le cadre du marché des granulats, et c'est souvent la distance entre le

lieu de production et celui de consommation qui impacte le plus la décision d'achat. Toutefois avec trois modes de transport possibles – la route, le rail et le transport fluvial qui sont presque toujours combinés –, la complexité du problème augmente, puisque le coût du tonnage au kilomètre par la route n'est pas du même ordre de grandeur que celui du fret ferroviaire ou celui du transport fluvial. Enfin, la qualité souhaitée des matériaux impose des flux préférentiels qui sont parfois altérés par un usage dégradé de la ressource initiale.

La simulation d'un marché est possible, si l'outil de résolution est suffisamment souple pour offrir à l'utilisateur de multiples configurations (offre et demande variables dans l'espace et dans le temps, par exemple) et s'il répond rapidement au cadre choisi.

Ce cadre est toutefois une simplification de la réalité des échanges qui sont schématisés dans les outils. Ces outils

(1) Remerciements : Cette recherche et le développement de l'outil ont bénéficié pendant trois ans du programme Écotechnologies & ÉcoServices de l'Agence nationale de la recherche. Les discussions et échanges d'informations avec l'ensemble des partenaires du projet AGREGA ont contribué largement à la cohérence de l'outil et de ses résultats. Le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), le département de Recherches en économie écologique de l'Université de Versailles (REEDS/UVSQ), les Voies navigables de France (VNF), l'Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région Île-de-France (IAU IDF), ainsi que les trois organismes co-auteurs de cet article, ont ainsi partagé leur connaissance du marché des granulats en Île-de-France.

restent des outils d'aide à la décision qui doivent être manipulés par des utilisateurs avertis. Les exemples donnés dans l'article sont fournis à titre d'illustration.

L'article se compose de quatre parties. Après la présentation du cadre de cette recherche appliquée au marché des granulats (partie 1), l'outil de simulation est décrit dans le détail de ses données d'entrée et de sortie ainsi que son interface utilisateur qui, à la manière d'un jeu sérieux, propose de multiples choix à l'opérateur (partie 2). Ces choix ont été guidés par la réflexion autour de scénarios possibles d'évolution du marché des granulats qui sont décrits en partie 3. Enfin, des résultats de simulations sont discutés en quatrième et dernière partie.

## Contexte de l'étude

La question de la soutenabilité du Grand Paris en matériaux a été posée dès 2012 par la DRIEE-IDF (Chazelle, 2012), car la densité de l'aménagement projeté, ainsi que la congestion des transports de la métropole ont rapidement mis en évidence cette problématique auprès des acteurs publics. Ces derniers sont alors déjà bien conscients « du risque avéré de tension sur les ressources en granulats » et de la nécessaire « solidarité interrégionale » pour répondre aux demandes du secteur du BTP en Île-de-France. Toutefois, pour répondre à cette question, il faut disposer des données du marché produites par de multiples instituts. Ces acteurs conjuguent régulièrement leurs efforts pour établir un panorama régional, comme ils l'ont fait dernièrement (DRIEE-IDF, IAU, UNICEM, 2017). Ils sont aidés par les producteurs de granulats et les transporteurs-distributeurs qui conjointement font face aux impératifs de qualité des produits et de toute la logistique liée à ces matériaux pondéreux (UNPG, 2012).

Ce marché est, de fait, en constante évolution. En effet, les sources d'alimentation en granulats peuvent se tarir en raison des limites administratives des autorisations d'exploitation. Elles peuvent aussi s'accroître du fait de l'exploitation des granulats marins, largement discutée car cette ressource est sensible (Toupin, 2004). L'utilisation de granulats recyclés, source vertueuse, est également débattue, car les impératifs de qualité des ouvrages finis réduisent bien souvent leurs applications à l'enfouissement des canalisations ou aux sous-couches routières. Les caractéristiques des matériaux réutilisables sont très précises (CEREMA, 2014). La demande en matériaux est aussi très variable, en quantité, en localisation spatiale et en délais. Le projet d'aménagement de l'Île-de-France sur les quinze prochaines années, décrit dans le schéma directeur adopté en 2013 (CR IDF, 2013), est bien entendu une volonté qui sera mise en place au rythme imposé par les multiples contraintes de sa réalisation.

Ainsi, les acteurs disposent des informations nécessaires, mais la multiplicité des possibilités ou solutions requiert un outil informatique pour faire la synthèse des données et montrer les possibilités de flux. Un exemple appliqué à ce marché avait déjà été élaboré dans le cadre du projet ANR ANTAG "Anticipation of the access to the aggregate resource by breaking present schemes in the long term"

(Rodriguez Chavez, 2010 ; Rodriguez Chavez *et al.*, 2010). Les partenaires de cette recherche collaborative ont à nouveau mis en commun leurs compétences pour créer un outil informatique dédié au marché des granulats de la région Île-de-France. Afin de garantir l'ergonomie de l'outil, celle-ci a été confiée à un concepteur de jeux vidéo qui a réalisé l'interface utilisateur reliée à l'organe de résolution du marché, un solveur mathématique.

La confidentialité des données, dans le contexte d'un marché restreint et géographiquement ciblé, doit être garantie. Afin d'y parvenir, toutes les données ont été agrégées à l'échelle de bassins de production ou de zones de consommation regroupant de nombreuses entités individuelles. De même, le pas de temps annuel, considéré dans la résolution du marché, permet de cumuler les échanges. C'est aussi, dans ce cas, un moyen de simplifier les calculs.

## L'outil de simulation

Le simulateur de marché est un outil de type solveur par programmation linéaire basée sur la méthode du Simplexe, qui résout un problème à partir de données d'entrée et qui donne un résultat sous la forme d'un fichier de sortie. Le calcul réalisé est une optimisation d'un paramètre. Le paramètre choisi est, dans notre cas, une dépense globale minimale.

Le solveur *open source* *lp\_solve* a été choisi pour réaliser ces calculs. Il est multi-plateforme et a été développé par une équipe comprenant Michel Berkelaar, Kjell Eikland et Peter Notebaert (2004). L'intégration de ce solveur à notre application s'est fait à travers la librairie dynamique (*lp\_solve55.dll* – version 5.5) grâce à l'interface de programmation fournie (API). *lp\_solve* est sous licence GNU – LGPL (Lesser General Public License – pour consulter la documentation et les termes spécifiques du contrat de licence, voir : <http://lpsolve.sourceforge.net/5.5/>).

Avant de procéder à la programmation de l'outil de simulation, une réflexion et des discussions avec les partenaires ont permis de choisir la configuration requise pour l'usage du simulateur. Il s'agit d'une configuration classique, celle d'un ordinateur de bureau de type PC, équipé de Windows. Toutes les librairies et outils sont en *open source*, il n'est donc nullement besoin d'acheter un logiciel spécifique pour pouvoir utiliser ce simulateur. De même, une attention particulière a été apportée aux performances de calcul afin d'accéder aux résultats dans des temps de réponse acceptables. La programmation a permis d'optimiser le fonctionnement de telle sorte que, sur les divers ordinateurs et pour les différentes simulations réalisées, quelques secondes suffisent. En effet, seuls les trajets physiquement possibles prennent part à l'optimisation du marché des granulats en région Île-de-France. Ce mode de programmation allège considérablement la résolution mathématique entre l'offre et la demande et permet un fonctionnement du simulateur sur un équipement informatique « modeste ».

La méthode de résolution mathématique retenue (programmation linéaire) relève d'un choix. Elle n'est pas la

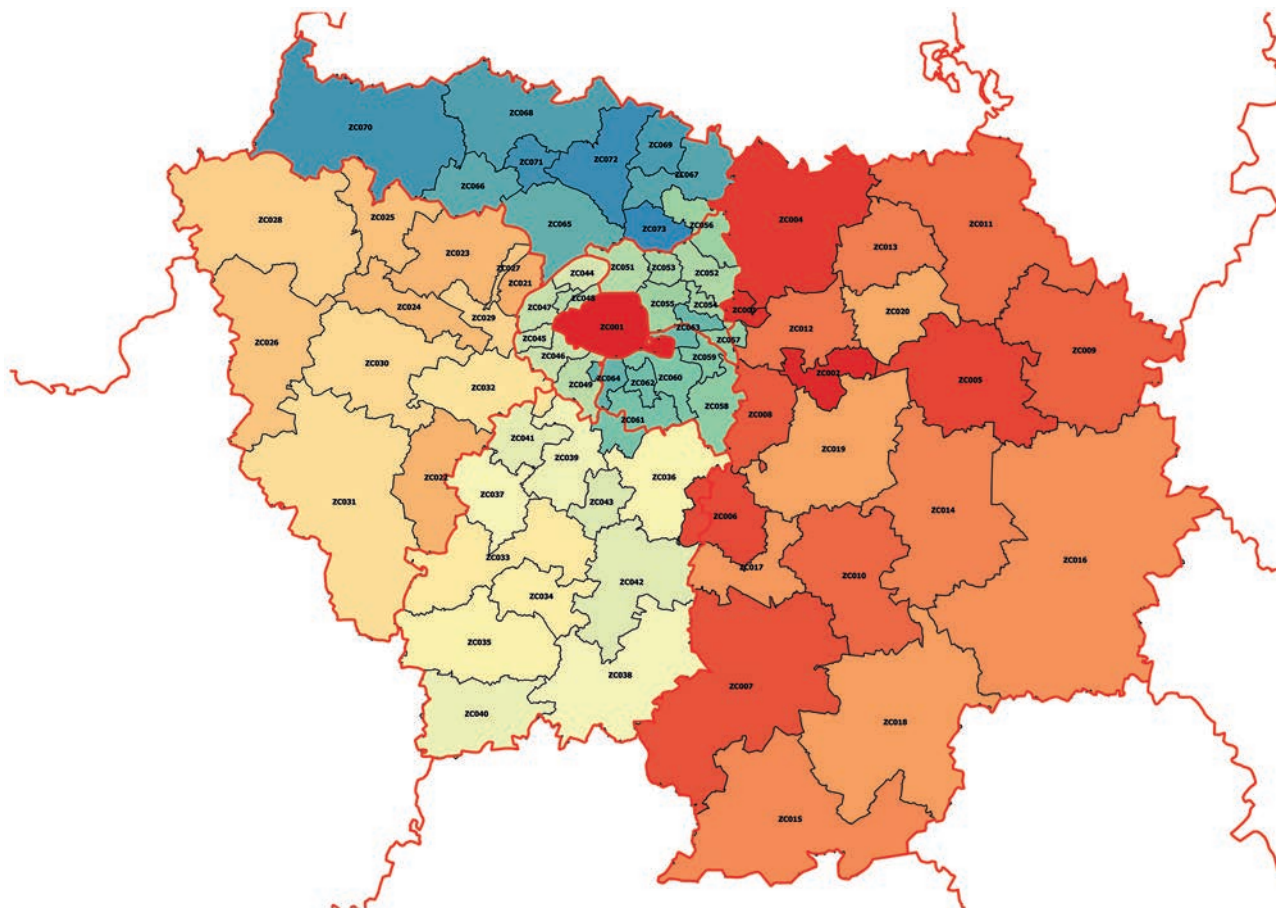


Figure 1 : Carte des 73 centres de consommation de l'Île-de-France (identifiés par leur numéro).

seule possible. En effet, compte tenu de la forte composante logistique du problème posé – un approvisionnement par un ensemble de points fournisseurs d'un ensemble de points consommateurs *via* un réseau d'acheminement –, une méthode couramment employée est celle du modèle gravitaire. Elle a d'ailleurs été mise en œuvre pour l'estimation des flux français dans le BTP (Corget *et al.*, 2013). Le fait de ne pas avoir fait appel à cette méthode, pourtant envisagée avant le montage du projet AGREGA, relève essentiellement des considérations d'implémentation évoquées *supra*.

### Données

Dans le fonctionnement agrégé, les fichiers d'entrée sont au nombre de trois. Ce sont des fichiers « texte », qui se présentent sous la forme de listes de données et de valeurs, au format CSV, le séparateur étant le point-virgule et la décimale étant matérialisée par un point. Ce format est très facilement gérable avec le logiciel Excel, par exemple.

#### Fichier des centres de consommation

Les centres de consommation correspondent à des zones plus ou moins étendues de la région Île-de-France (73 au total), dont le découpage a été fourni par les partenaires (voir la Figure 1 ci-dessus).

Ce fichier de données comporte six colonnes : l'index de la zone de consommation, son numéro de département, son nom, sa consommation en BB (béton bitumineux =>

enrobés), celle en BH (béton hydraulique) et, enfin, celle destinée aux VR (voirie et réseaux).

Quand on parle de consommation en BB, il faut comprendre consommation directe de granulats nécessaires à la fabrication de béton bitumineux. Par exemple, la valeur correspondante pour Paris est égale à 0, car aucune centrale d'enrobés n'est présente dans la capitale ; elles sont toutes situées en petite couronne. La consommation annuelle en granulats pour les bétons hydrauliques de Paris est d'environ 1 790 kilotonnes (kt), et elle est de 930 kt en granulats pour la voirie et les réseaux.

#### Fichier des bassins de production

Les bassins de production correspondent à des zones présentant une unité « de terroir » et d'usage du point de vue des granulats, c'est un ensemble de carrières extrayant une formation géologique qui correspond à un produit type sur le marché des granulats. Ils sont au nombre de quatre-vingt-cinq à avoir été identifiés comme des fournisseurs potentiels de granulats pour la région Île-de-France.

Le fichier correspondant à ces données est organisé à partir de onze colonnes détaillées ci-après. Il comporte trois informations administratives : l'index du bassin de production (ID unique), le numéro de département et un nom court. Ensuite, la production technique du bassin de production (valeur en kt pour une année) et son taux de disponibilité (valeur comprise entre 0 et 1, soit de 0

à 100 %) complètent le fichier. Ensuite, six valeurs définissent les statuts pour le bassin de production en BH, VR et BB, ainsi que les accès au transport par la route, par un moyen combiné route/fluvial ou par un transport combiné route/voie ferrée.

Le statut vis-à-vis d'un type de ressource est par exemple égal à 0, si la qualité n'est pas disponible ; à 1, si la qualité est disponible pour l'usage considéré ; et à 2, si la qualité est disponible pour un usage dégradé (*a priori* VR) et seulement localement, à proximité du site de production (dans le simulateur, cela est valable pour une distance inférieure ou égale à 15 km).

De même, pour les accès aux trois modes de transport, 0 signifie pas d'accès et 1 accès possible. On remarquera que seuls les bassins de production ayant au moins une carrière embranchée sur le rail disposent de cet accès ferroviaire.

Les noms des bassins de production reportés sur la carte (voir la Figure 2 ci-après) correspondent à l'identifiant du bassin et à leur numéro de ligne dans les tableaux de données. Il est ainsi très facile de modifier ou de corriger une valeur.

Ce fichier présente quelques particularités. En effet, la région peut recourir aux granulats marins (Secrétariat général de la Mer, 2006). Ceux-ci étant extraits et approvisionnés *via* le port du Havre et la Seine, il a été décidé de créer un bassin supplémentaire, le n°85, localisé à Rouen, où sont généralement reconditionnés ces matériaux et qui

dispose de la capacité de production correspondante. De plus, les départements de Paris et de la petite couronne peuvent fournir des matériaux recyclés sur ce marché. Ils correspondent aux « producteurs n°76 à 83 » de matériaux recyclés dédiés aux usages voiries et réseaux et pouvant être acheminés *via* la route ou la Seine.

Enfin, le producteur n°84 RZ00 est un producteur virtuel, dit de « secours informatique », qui permet de trouver une solution face à toute insuffisance des producteurs réels de granulats. Sa capacité de production est donc estimée de telle façon qu'elle ne sera jamais consommée totalement. Ce producteur imaginaire est situé hors de France et il n'a accès qu'à la route pour transporter à prix d'or son granulats virtuel. Il permet donc au solveur de trouver une solution possible qui fait en réalité apparaître aux yeux de l'utilisateur un déficit de production par rapport à l'offre réelle.

### Fichier des coûts rendus sur les centres de consommation

C'est un fichier plus volumineux qui comporte pour l'instant 6 205 options de trajets entre les bassins de production et les zones de consommation. Il comporte six colonnes dont l'identifiant unique de la zone de consommation et celui du bassin de production dans la base de données. Ensuite, trois coûts exprimés en euros pour les différentes combinaisons de trajets : routier, combiné route/fleuve et celui route/rail. Ces coûts incluent le coût départ du site de production.

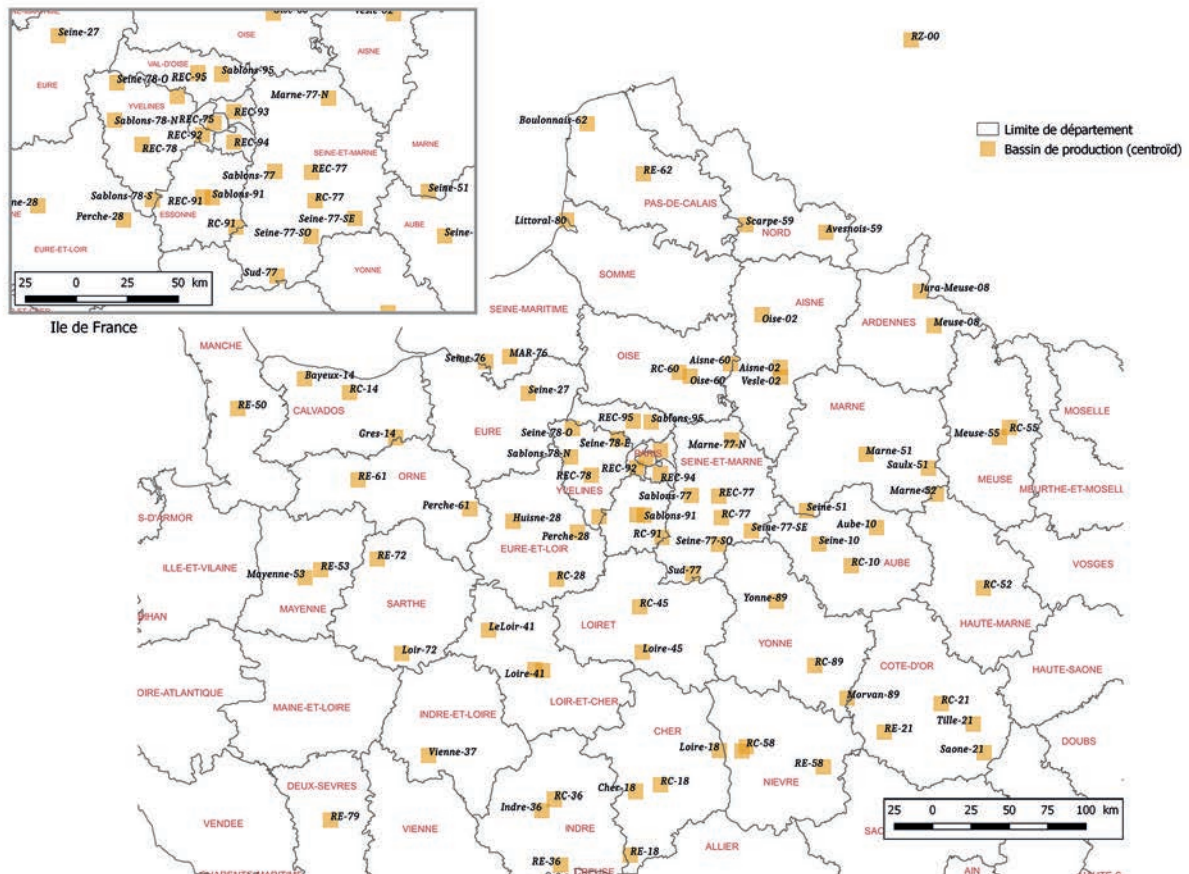


Figure 2 : La carte des bassins de production pouvant alimenter le marché de l'Île-de-France.

Il faut noter que le coût du transport combiné route/rail a été surestimé pour les distances inférieures à 120 km entre le producteur et le consommateur, du fait qu'actuellement, cette option de trajet n'est jamais utilisée dans un tel contexte. La minimisation de la dépense recherchée par le solveur fait qu'il ne la choisira pas non plus.

Les coûts et distances sont des éléments très sensibles de la résolution du marché. Une attention particulière leur a été apportée. Les trajets possibles ont été définis par les partenaires et découpés en sections pour les transports combinés. Les itinéraires des matériaux ont finalement été établis par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières et le service des Voies Navigables de France qui ont su homogénéiser leurs cartes.

Un exemple est présenté ci-après et il est tout à fait représentatif du contenu de cette base de données.

Entre Paris ZC001 et les producteurs de l'Aisne BPA001, il y a 132,2 km à parcourir par la route. Dans le cas où ce trajet serait réalisé en utilisant le transport fluvial, le trajet serait en réalité plus long et nécessiterait de parcourir 227 km *via* le réseau fluvial et 20 km en transport routier, soit un total de 247 km. Enfin, pour un transport combiné fer/route, le trajet ferré serait de 122 km et celui routier de 30 km, soit un total de 152 km. Cela est synthétisé (voir le Tableau 1 ci-dessous) à partir d'un exemple qui est un extrait de la base de données trajets.

75-Paris	Kilométrage
Route directe	132
Fluvial/Route	247
<i>fluvial - part route</i>	20
<i>fluvial - part fleuve</i>	227
Fer/Route	152
<i>fer - part route</i>	30
<i>fer - part fer</i>	122

Tableau 1 : Décomposition en sections des trajets en transports combinés.

Concernant les coûts correspondants, ils sont calculés automatiquement à partir des coûts unitaires (voir le Tableau 2 ci-après). On remarquera que, dans ces calculs, le coût des ruptures de charge (transbordement) est ignoré (égal à 0 euro). Cela favorise automatiquement les modes de transport combinés, car, dans la réalité, ce coût est d'environ 1 ou 2 euros par tonne.

coût unitaire transport direct par la route	0,15	€/t.km
coût unitaire transport fluvial	0,03	€/t.km
coût unitaire transport fluvial – route secondaire	0,15	€/t.km
coût rupture de charge plateforme fluvial-route	0,0	€/t
coût unitaire transport fer	0,05	€/t.km
coût unitaire transport fer – route secondaire	0,15	€/t.km
coût rupture de charge plateforme fer-route	0,0	€/t

Tableau 2 : Coûts unitaires des différents transports utilisés.

Ainsi :

- $132,2 \text{ km} \times 0,15 = 19,83 \text{ euros/t}$  pour la route ;
- $228 \text{ km} \times 0,03 + 20 \text{ km} \times 0,15 = 9,84 \text{ euros/t}$  pour le

combiné route/fluvial ;

- $122 \text{ km} \times 0,05 + 30 \text{ km} \times 0,15 = 10,60 \text{ euros/t}$  pour le combiné route/fer.

À cela, il faut ajouter le coût du granulat au départ de la carrière, son « coût de production ». Il a été estimé dans une fourchette comprise entre 8 et 10 euros la tonne pour l'ensemble des sites de production, et pour le bassin de l'Aisne, dans notre exemple, à 8,80 euros/tonne. Ces montants, à vocation pédagogique, ne correspondent pas à une réalité de terrain.

On obtient les valeurs suivantes :

- $19,83 + 8,80 = 28,63 \text{ euros/t}$  rendu sur site de consommation par la route ;
- $9,84 + 8,80 = 18,64 \text{ euros/t}$  rendu sur site de consommation par le combiné route/fluvial ;
- $10,60 + 8,80 = 19,40 \text{ euros/t}$  rendu sur site de consommation par le combiné route/voie ferrée.

Pour les zones de production, les trajets routiers ont été estimés à partir des chefs-lieux de département (hors Île-de-France) et à partir des communes-pivots des zones de production de l'Île-de-France. Pour les centres de consommation, le trajet s'arrête au niveau de la commune-pivot de la zone géographique associée.

Enfin, l'ensemble des fichiers d'entrée sont présentés (voir la Figure 3 de la page suivante). On notera qu'il est très facile d'ajouter ou de supprimer des centres de consommation ou des zones de production, puisqu'il suffit d'insérer ou d'effacer des lignes dans les tableaux. Toutefois, il faut être en mesure d'ajouter le panel des trajets possibles entre ces zones de production et les centres de consommation déjà existants, soit, par exemple,  $Y \times 73$  trajets.

### Optimisation et solveur

La Figure 4 de la page suivante présente l'organisation interne de l'outil de simulation et les liaisons informatiques possibles entre les fichiers d'entrée, le solveur, le fichier résultat et les deux outils privilégiés que sont le logiciel QGIS et le gestionnaire de la base de données. En effet, cet ensemble d'outils *open source* est particulièrement adapté à ce jeu de données géo-référencées. C'est aussi un moyen très pratique pour procéder à la mise à jour des données, l'actualisation des productions...

La Figure 5 de la page 113 présente de manière synthétique la résolution matricielle du marché des granulats. Les informations « producteurs de granulats » correspondent aux colonnes, celles relatives aux consommateurs aux lignes. L'optimisation est contrainte par la qualité des produits fournis et consommés. La production totale et maximale de chaque zone ne peut être dépassée. Les trois types de trajet sont envisagés et comparés. Enfin, il faut satisfaire la demande tout en minimisant la dépense globale sociétale.

### Interface et jeu sérieux

Afin de garantir un usage souple du solveur, pour un utilisateur n'ayant que peu de connaissances informatiques, une interface sous la forme d'un jeu vidéo a été réalisée par Andreil Game. Elle rend l'utilisation du solveur plus

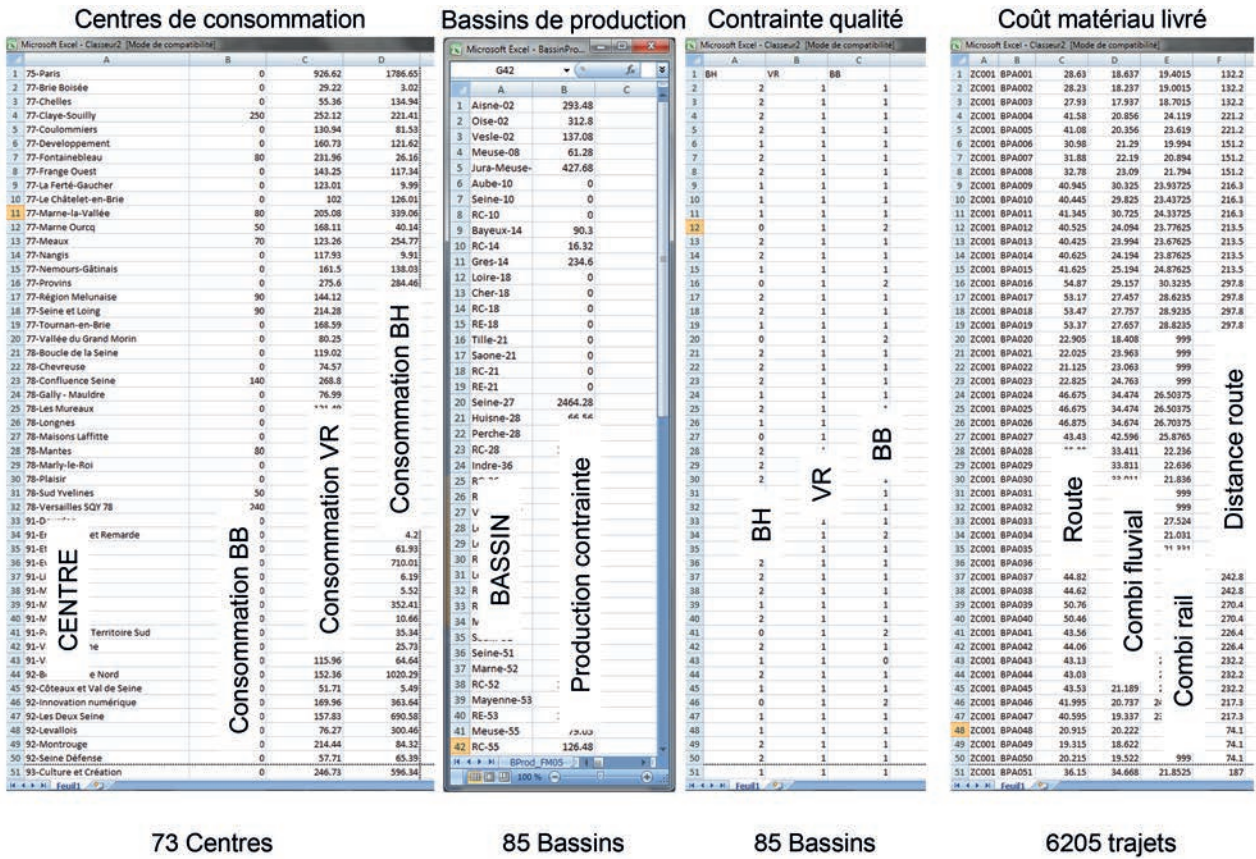


Figure 3 : Synthèse des données des fichiers d'entrée (extraits des fichiers).

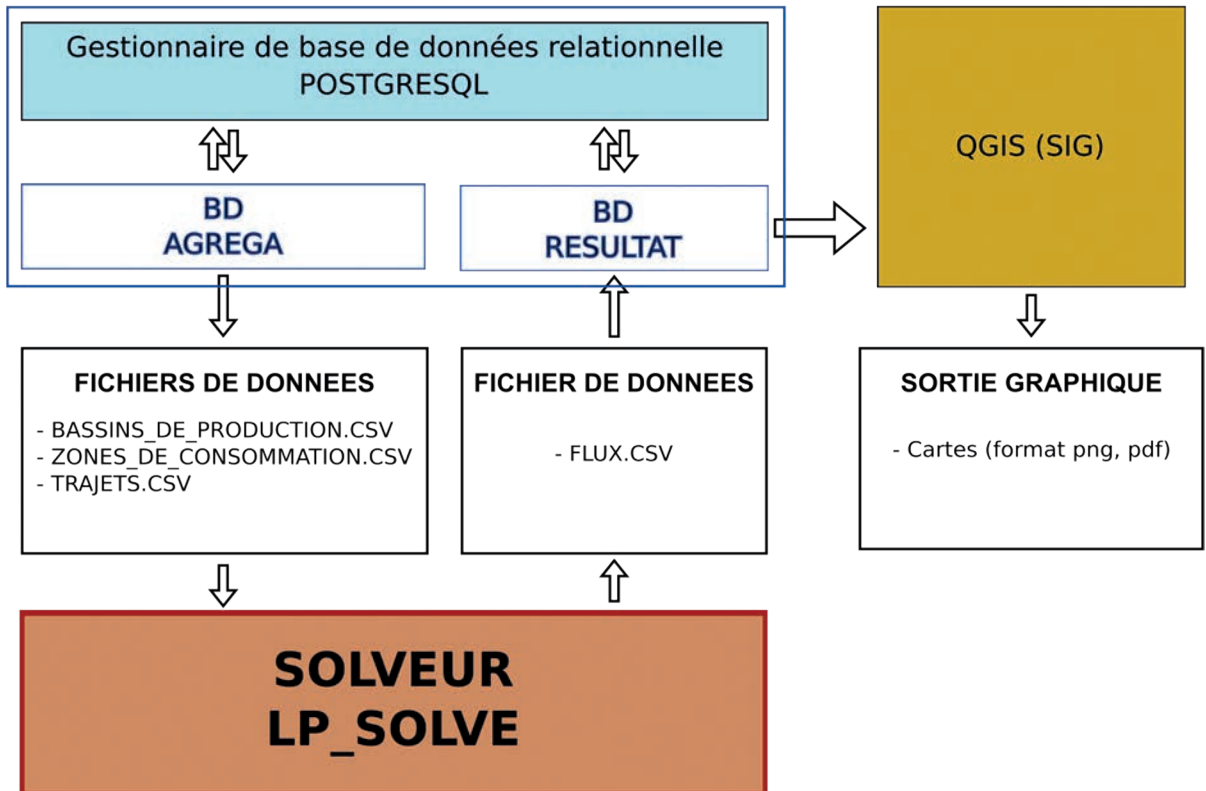


Figure 4 : Organisation de l'outil simulateur et indication des liaisons informatiques.

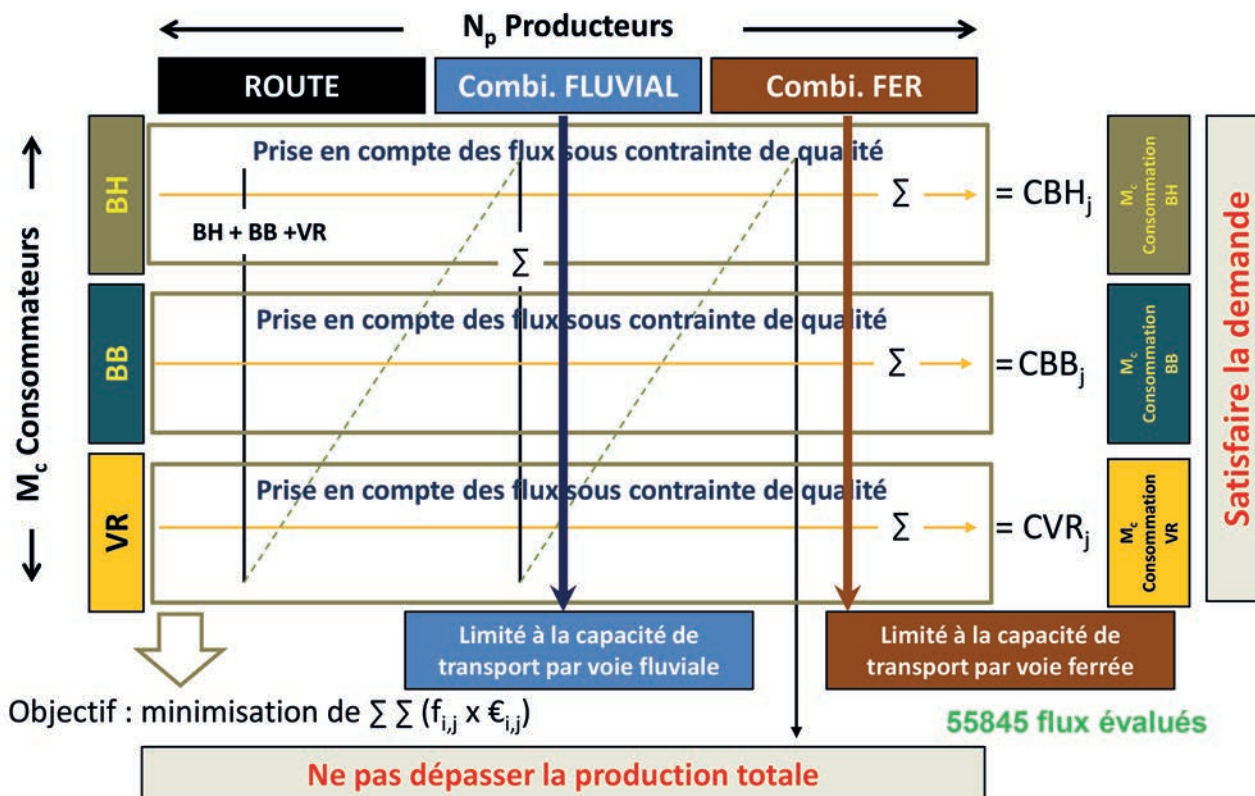


Figure 5 : Schéma de la résolution matricielle du marché des granulats en région Île-de-France.

simple en centralisant toutes les interactions (QGIS et Excel deviennent optionnels). Elle permet, par exemple, d'afficher, pour chaque bassin de production, sa capacité à produire tel ou tel type de matériaux (voir la Figure 6 de la page suivante), ou de voir s'il est raccordé au réseau ferré (voir la Figure 7 de la page suivante).

Cette interface permet aussi de modifier aisément un nombre important de paramètres comme le montre la partie droite de l'écran vidéo de la Figure 6 : coût des transports ; valeur de la consommation globale en granulats de chaque type (BH, BB, VR) ; production technique des bassins, et cela en un seul clic. Elle permet bien entendu de recalculer une solution d'approvisionnement du marché et d'afficher les flux en résultant (voir les Figures 8 à 13).

## Scénarios d'évolution du marché des granulats

Les discussions entre les partenaires du projet AGREGA ont permis de définir « un scénario » comme étant un panorama, à venir, de l'Île-de-France, avec une évolution temporelle sur une trentaine d'années. Ce panorama doit de plus être partagé par un large panel d'acteurs de ce secteur d'activité.

### Les différents scénarios proposés au comité d'utilisateurs

Ainsi, cinq scénarios ont été proposés à un panel d'acteurs du marché des granulats. Dans cette approche, les scénarios ne sont ni concurrentiels ni antinomiques. C'est-à-dire que les événements proposés peuvent éventuellement se cumuler. L'objectif de cet ensemble de scénarios était de montrer la polyvalence de l'outil de simulation. En effet,

pour chacun des scénarios décrits ci-dessous, c'est en fait, à chaque fois, un paramètre différent du modèle qui évolue.

### Scénario 1 – La consommation de granulats change (dans la perspective des Jeux Olympiques 2024)

Avec cet événement, un village olympique et un complexe nautique sont à construire : cela équivaut à 350 000 tonnes de granulats consommées pour le béton prêt à l'emploi en supplément de l'activité traditionnelle de ce secteur. Ces chantiers s'échelonnent probablement sur trois années, de 2020 à 2023.

### Scénarios 2 et 3 – Le planning de réalisation d'un projet évolue (scénario Grand Paris Logements et scénario Grand Paris Transports)

Le projet Grand Paris Logements comprend 70 000 logements neufs à construire par an et sur vingt ans, soit une surconsommation de 5 à 7 Mt de granulats par an (en parallèle, autour des gares de la région IDF, 17 000 logements seront démolis chaque année).

Le Grand Paris Transports, quant à lui, représente 150 km de tunnels, 50 km de voies ferrées et 68 nouvelles gares. Ce sont environ 4 Mt de granulats supplémentaires par an qui seront consommées d'ici à 2030.

Ces deux scénarios, très ambitieux, peuvent avoir divers calendriers de réalisation, l'outil de simulation permet de générer ces plannings plus ou moins stressants pour le marché.

### Scénario 4 – Le maillage du réseau de transport est modifié (Canal Seine-Nord)

Il s'agit de creuser, d'ici à 2024, un canal au gabarit européen. Dans ce type d'ouvrage, la consommation d'enro-



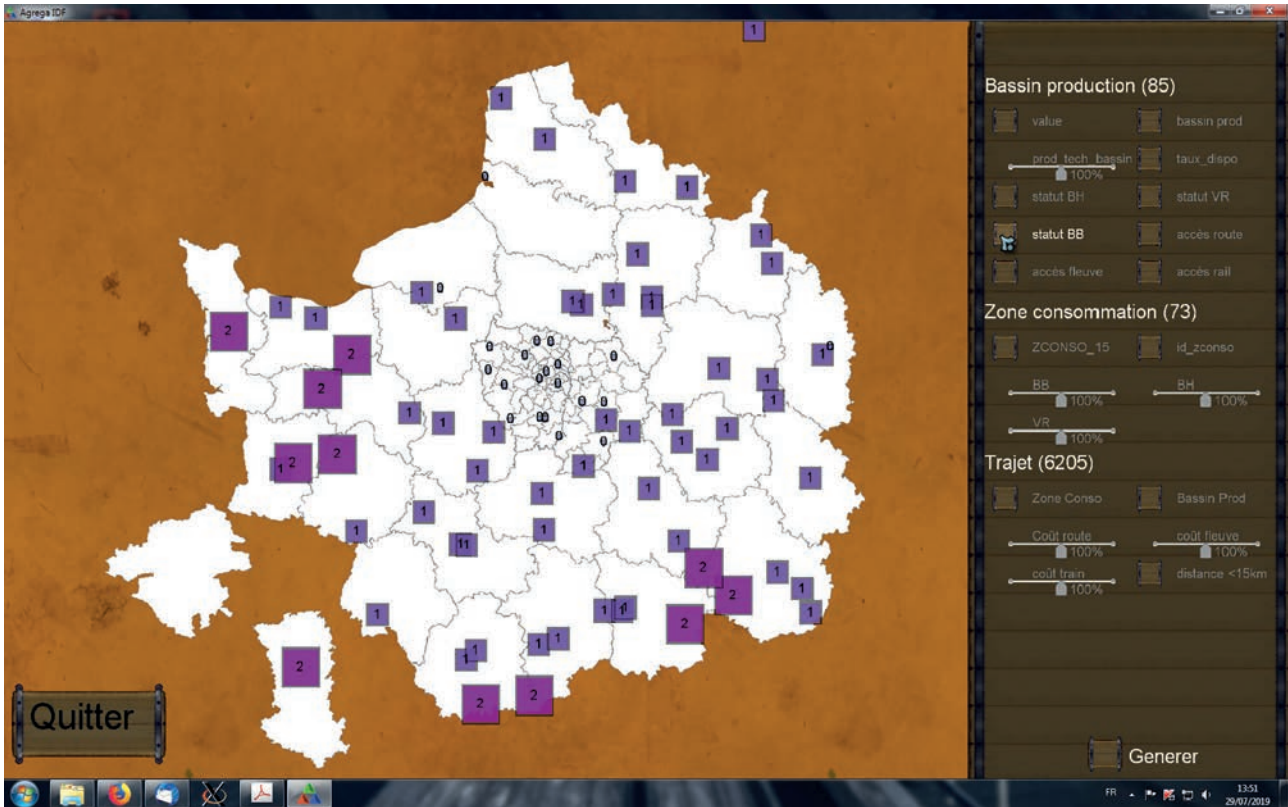


Figure 6 : Écran de type jeu vidéo montrant le statut BB des différents bassins de production.

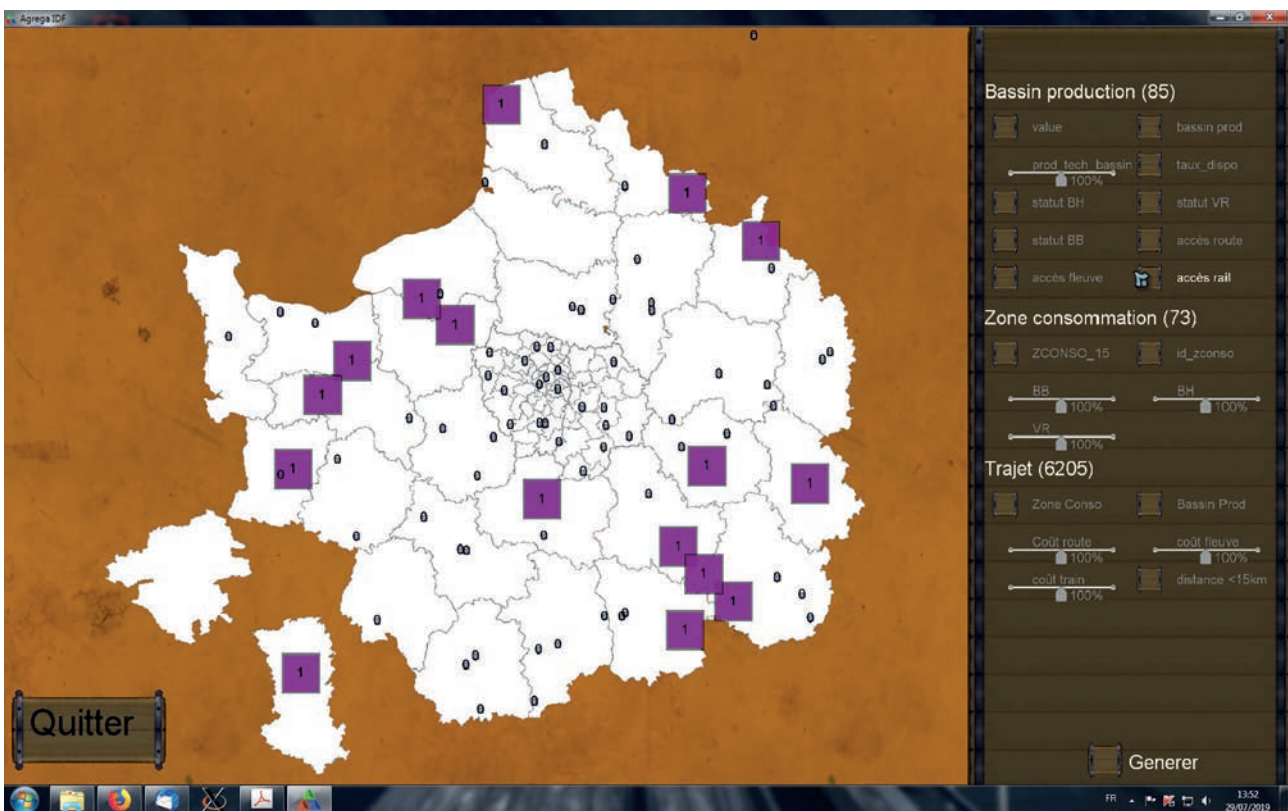


Figure 7 : Écran de type jeu vidéo montrant les bassins de production ayant un accès au réseau ferré.

chements et de remblais concerne les volumes les plus importants. Ce type de projet n'impacte donc pas directement la consommation de granulats de la région IDF. Il aurait toutefois un impact sur le coût du transport des granulats vers l'Île-de-France et aussi sur la capacité totale ou maximale de la voie fluviale à acheminer des matériaux vers Paris. Il faut noter que la flotte « grand gabarit » devra aussi évoluer sur ce tronçon. La localisation des plateformes modales de chargement peut être optimisée, de même que la position des plateformes « eau-eau » au cœur du périmètre. Dans ce projet, c'est le cheminement des matériaux qui est impacté (tracé fluvial), plus précisément la capacité du transport fluvial à l'assurer, et aussi son coût, car le gabarit des bateaux et la concurrence entre les transporteurs et entre les producteurs seraient favorables à une baisse des prix.

### Scénario 5 – La pression sociétale se renforce (zéro déchet pour l'IDF)

Avec la démolition de bâtiments, on peut générer une tonne de déchets inertes non dangereux par mètre carré de surface habitable déconstruite (Conseil régional IDF, PREDEC 2015). Pour réaliser un tri efficace de ces matériaux, il faudra installer une dizaine de plateformes de concassage et de tri dans la région. La localisation de ces plateformes peut être optimisée afin de limiter le transport des matériaux, par exemple. Ce scénario peut être étudié seul, mais, en réalité, il sera probablement conjugué avec l'ensemble des autres scénarios, car cette dynamique visant à la « réduction des déchets » fait actuellement consensus. Cela est d'autant plus justifié dans le cas des granulats par le fait que ce sont des matériaux pondéreux et recyclables, donc l'énergie nécessaire à leur production et à leur transport est significative.

### Le scénario retenu

À partir des éléments discutés par le comité des utilisateurs potentiels de l'outil et des remarques formulées par les partenaires, le scénario le plus intéressant pour la filière granulats est celui qui concerne le projet Grand Paris Logements, car la demande est alors répartie sur l'ensemble des communes du département de Paris et de ceux de ses deux couronnes (petite et grande couronnes). Le calendrier est encore assez flou et dépendrait d'incitations fiscales... Ce sont donc ces résultats qui sont présentés dans le paragraphe suivant.

Enfin, on remarque aussi que la définition des scénarios conjointement à l'élaboration du modèle a permis d'insérer immédiatement les leviers nécessaires à ces simulations et d'adapter la précision requise dans l'outil.

## Résultats et usages

### Résultats de la simulation de l'état initial

Afin de montrer la pertinence ou la validité de l'outil de simulation, il a été choisi de simuler une année passée, pour laquelle nous disposons de données d'entrée et des observations formulées par les acteurs du marché. Il s'agit d'une année se situant entre 2010 et 2017, voisine de 2015. Cette année-là, 26 Mt de granulats ont été échangées entre les bassins de production et l'Île-de-France.

On peut observer, sur les Figure 8 à 10 de la page suivante, les cartes de flux et de matériaux correspondants. Par exemple, sur la Figure 8, on constate que sur un total de 13,2 Mt de granulats de qualité destinés à la fabrication de béton, 49,3 % sont fournis par des producteurs de la région Île-de-France et 50,7 % viennent des régions voisines. Sur ce tonnage, presque 8 Mt transitent *via* le transport combiné route/fluvial.

Les flux simulés étant cohérents avec la réalité du marché observée par les partenaires du projet, d'autres simulations ont été effectuées.

Les granulats destinés aux bétons bitumineux sont, pour des raisons techniques (matériaux frottants), majoritairement issus de roches éruptives. Ils proviennent donc du secteur géographique sud-ouest sur la carte de la Figure 10, dans lequel ce type de roches affleure. On remarque qu'ils sont actuellement transportés *via* un transport combiné route/voie ferrée.

### Résultats pour 2024

Dans le cadre de la construction du Grand Paris, un accroissement de la demande en granulats est estimé à 4 Mt, qui ont été réparties sur les zones de consommation correspondantes. Au niveau des matériaux, les quantités des différentes qualités ont été augmentées de façon proportionnelle. La demande totale est donc de 30 Mt. Pour cette simulation, les moyens de transport de la situation initiale ont été conservés à l'identique, mais l'offre en granulats a été réduite en nous appuyant sur notre connaissance des années butoirs : fin des autorisations d'exploitation présentes dans la base de données. Le déficit de l'offre en granulats est donc beaucoup plus important que dans le scénario précédent : 35,6 % des besoins en granulats pour le BH et 15,3 % pour le VR. Les cartes de flux de matériaux correspondantes (voir les Figures 11 et 12 de la page 117) font ainsi apparaître un déficit de l'offre conduisant à solliciter de manière importante le producteur virtuel RZ00 – dit de « secours informatique » – localisé fictivement au Nord-Est sur la carte.

Si l'on compare les trajets du granulat pour le béton hydraulique de la situation initiale (voir la Figure 8) et de l'année 2024 (voir la Figure 11), on note de plus grandes distances parcourues en 2024. La part Île-de-France passe de 49,3 % dans la situation initiale à 27,4 % en 2024. La dépendance de l'IDF s'est donc largement accrue dans cette configuration.

Pour les granulats destinés aux réseaux et aux sous-couches de chaussée, la dépendance de l'IDF est légèrement plus importante (voir la Figure 12). Le déficit de l'offre est alors d'environ 1,75 Mt.

Enfin, pour les matériaux destinés aux bétons bitumineux, la situation est quasi identique en 2024 (voir la Figure 13 de la page 117) à la situation actuelle (voir la Figure 10), car il n'y a aucune ressource en IDF. L'essentiel des tonnages arrive alors toujours par le rail.

### Résultats pour le scénario 2024 amélioré

Un exemple est donné ici à titre d'illustration sur les pos-

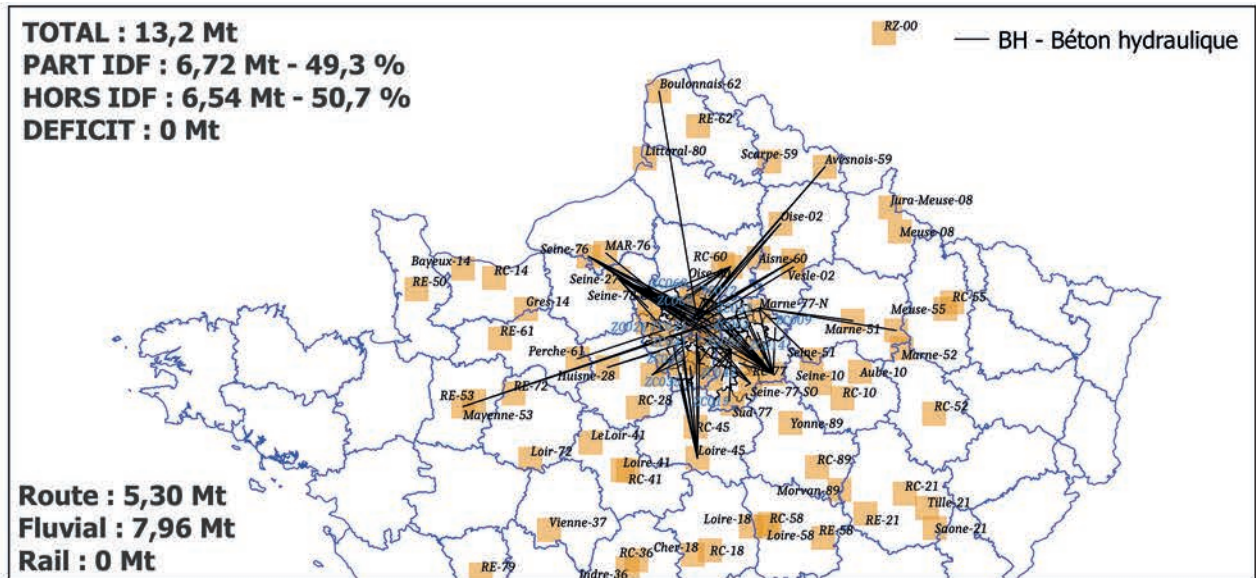


Figure 8 : Carte des flux de granulats pour le BH dans la situation initiale.

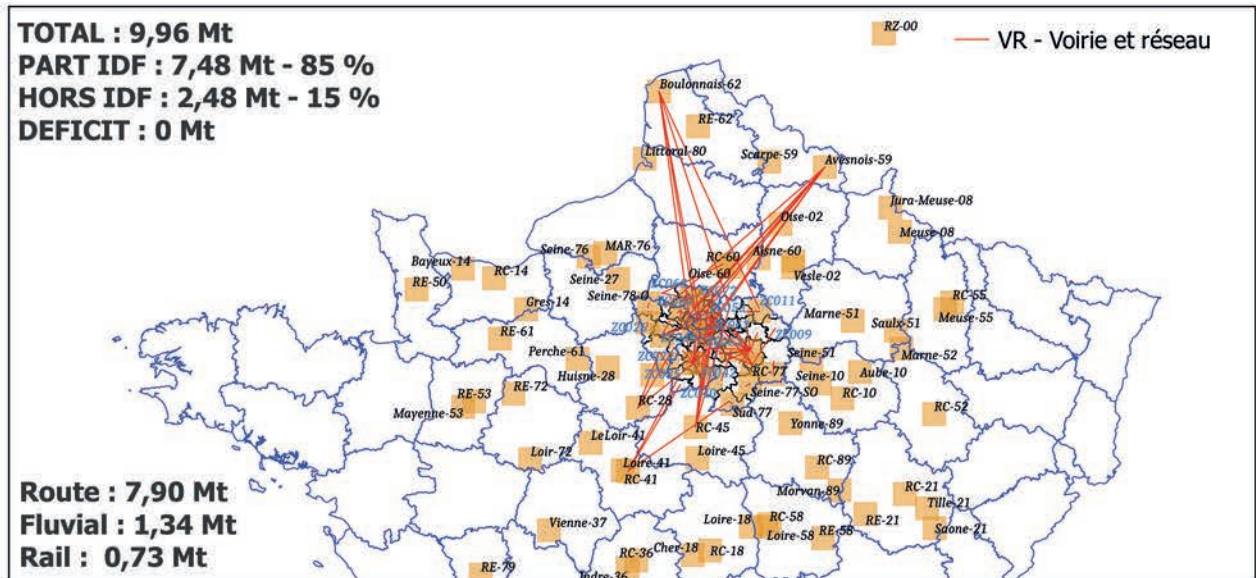


Figure 9 : Carte des flux de granulats pour le VR dans la situation initiale.

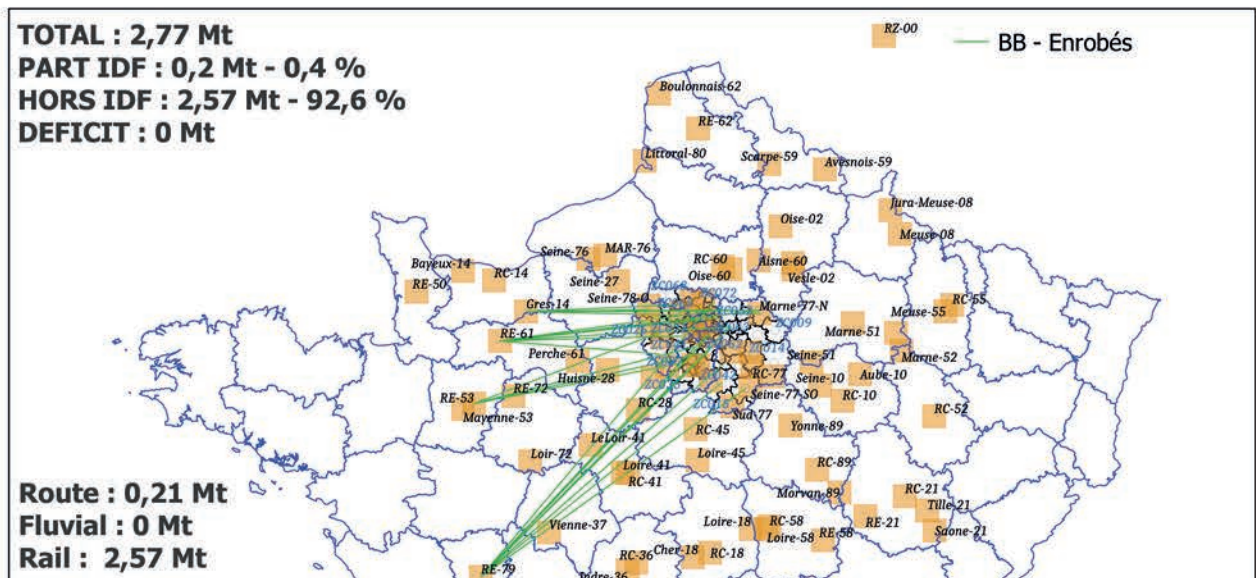


Figure 10 : Carte des flux de granulats pour le BB dans la situation initiale.

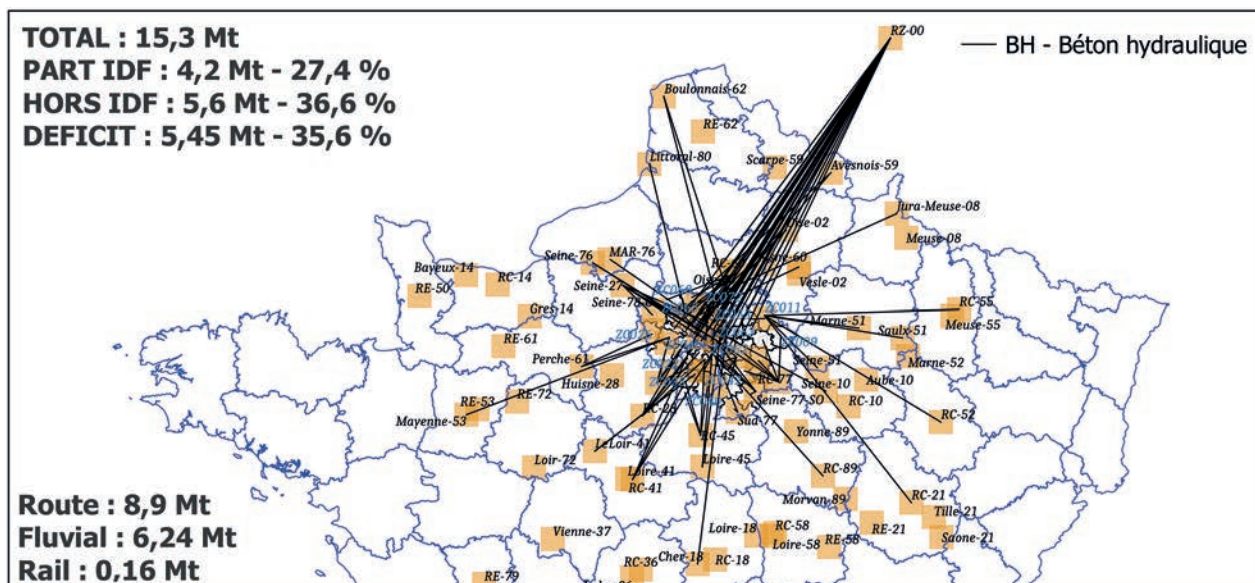


Figure 11 : Carte des flux de granulats pour le BH au titre de l'année 2024.

sibilités offertes par le simulateur. Il n'a pas la prétention de représenter la solution qui sera adoptée, mais plutôt l'une des solutions envisageables, et, surtout, il doit aider l'utilisateur du simulateur à imaginer d'autres solutions.

Plusieurs améliorations du marché peuvent être testées de manière simultanée :

- afin de réduire le déficit des matériaux de type VR, on implante plusieurs plateformes de tri et de recyclage à proximité des chantiers du Grand Paris ;
- afin de réduire le déficit des matériaux de type BH, on augmente la production de granulats marins, ainsi que la mise à disposition de ces granulats vers l'Île-de-France ;
- enfin, l'ensemble des carrières autorisées en Île-de-France, ainsi que ceux de la deuxième couronne, produisent 5 % de plus en termes de production moyenne.

Avec ces améliorations, le déficit des granulats destinés

au béton hydraulique est largement réduit. Quelques carrières, situées à plus longue distance, contribuent à assurer l'offre en granulats (les prix devraient donc augmenter, puisque le transport représente une part importante de ceux-ci). Le déficit en matériau VR est encore important, alors que le recyclage représente dans ce calcul plusieurs millions de tonnes. L'approvisionnement en matériaux pour les bétons bitumineux semble satisfait avec l'apport des carrières habituellement sollicitées. Le transport combiné rail/route pour ce type de matériaux est la voie privilégiée dans tous les scénarios.

### Exploiter pleinement les potentialités du simulateur

Comme on l'aura compris, l'outil proposé est fondamentalement un simulateur qui propose une solution (mathématiquement optimale au sens du coût global) en termes de flux dans le respect des données, notamment les consommations affichées et les productions disponibles

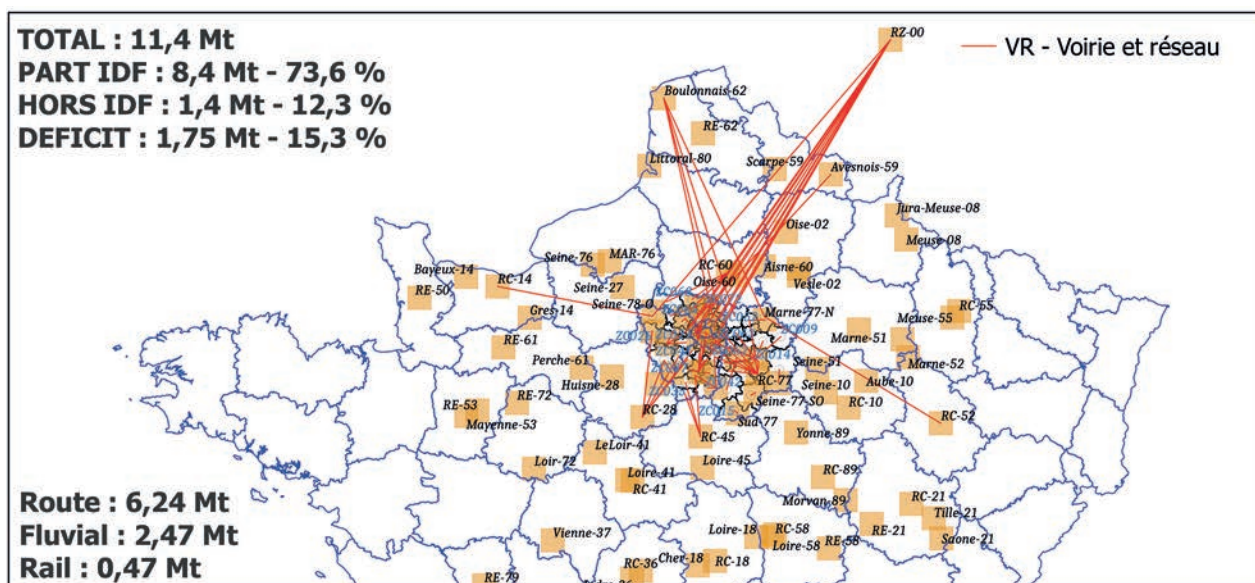


Figure 12 : Carte des flux de granulats pour le VR au titre de l'année 2024.

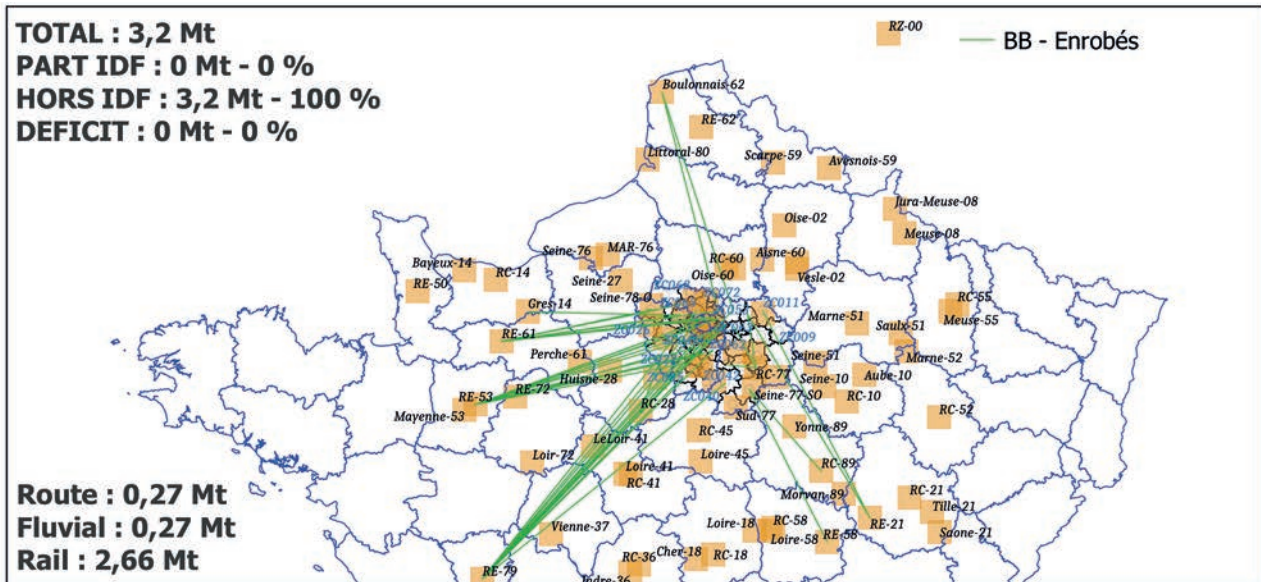


Figure 13 : Carte des flux de granulats pour le BB au titre de l'année 2024.

et leurs usages, qui sont alors autant de contraintes. Ainsi, le simulateur ne va pas « spontanément » augmenter les niveaux de production de certains bassins pour pallier les déficits constatés, mais il s'évertuera – c'est son rôle – à simuler les flux obtenus selon les « pistes » suggérées par l'utilisateur qui aura adapté ses données de production. C'est l'utilisateur qui a la main, il convient donc de voir comment.

Jouer sur les volumes de consommation présente certes un intérêt. Dans ce scénario du Grand Paris Logements, il est possible d'explorer une autre année que 2024 pour évaluer une distribution spatio-temporelle différente de la demande. En effet, le développement de tronçons d'infrastructure et la densification des logements obéissant à des échéanciers, on pourrait proposer un schéma d'approvisionnement adapté. On peut également pousser l'exercice en imaginant une réduction plus ou moins significative de la demande en granulats suite à leur substitution par un matériau de construction considéré comme moins impactant pour en évaluer l'effet sur les flux. Force est cependant d'admettre que c'est dans la recherche d'une solution d'approvisionnement nouvelle que se trouve l'apport principal de l'outil.

Les flux « optimaux » générés par le solveur sont par construction très sensibles aux coûts. Le coût est la somme d'un coût départ et d'un coût de transport. Le coût de départ, assimilable à un prix de vente (c'est-à-dire confidentiel), a été en quelque sorte « standardisé », il a donc peu d'influence. Un utilisateur averti pourra vérifier l'effet d'un *dumping* sur une sélection de bassins de production pour évaluer leur capacité à pénétrer le marché de l'IDF. Les coûts de transport sont directement liés au schéma modal et encore plus intimement à la distance. À ce titre, agir sur la disponibilité des tronçons, voire leur capacité, et leurs coûts relatifs offre la possibilité aux décideurs institutionnels d'évaluer l'impact des transports dits alternatifs, les gains potentiels de CO<sub>2</sub> étant liés aux

mêmes ordres de grandeur que les coûts.

La principale variable sur laquelle l'utilisateur doit agir est l'offre, en d'autres termes le tonnage maximal que chaque bassin peut fournir pour approvisionner la demande de l'IDF.

Cette offre est la résultante d'une production technique, forcément limitée, voire maximale pour le bassin considéré, et du taux de disponibilité de celle-ci (voir le paragraphe « Fichier des bassins de production ») pour satisfaire la demande de l'IDF. C'est l'effondrement de la production technique des bassins, à l'échéance de l'autorisation d'exploitation sur plusieurs sites, qui conduit au déficit possible en 2024. Bien sûr, il s'agit là d'hypothèses et certaines parties prenantes auront des connaissances plus précises sur le renouvellement de certaines autorisations. Mais il ne faut cependant pas négliger le fait que certaines sources pourraient se tarir.

C'est donc le taux de disponibilité de la production de chaque bassin pour alimenter l'IDF qui constitue le principal levier. L'intérêt essentiel de ce taux réside dans l'existence d'un marché local, qui n'est pas explicitement simulé. Si les taux proposés dans la situation initiale sont obtenus à partir des données statistiques disponibles sur les flux, ceux de 2024 sont laissés à la discrétion de l'utilisateur qui aura tendance à générer, plus probablement à accentuer l'effet « domino » induit par le besoin de l'IDF de s'approvisionner à hauteur de 50 % environ hors de sa zone.

La question qui taraude sans doute l'utilisateur est : pourquoi l'outil n'ajuste-t-il pas, toujours aussi spontanément, ces taux ? Tout simplement parce que la méthode n'a pas de « frein ».

En effet, d'un point de vue mathématique, la programmation linéaire a tendance à générer des solutions sur les sommets, donc à saturer les capacités. En pratique, il y a peu de raisons de ne pas prendre 100 %, si c'est per-

mis. Du point de vue du comportement, on a tout intérêt à prendre le maximum de volumes se situant au plus près, c'est la raison même de l'effet « domino ». Il faut d'ailleurs préciser que ce défaut de « gourmandise » est commun à tous les outils.

## Conclusion

Cet article fait donc une synthèse d'une partie du travail réalisé collectivement durant les deux dernières années du programme de recherche AGREGA, un programme coordonné par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Cette partie était dédiée au développement d'un outil informatique pouvant aider à la gestion du marché des granulats de la région Île-de-France. Ce logiciel permet de simuler ce marché dans de multiples configurations et de montrer des flux optimisés par le biais d'un solveur mathématique. Les scénarios ainsi discutés ont mis en évidence le rôle des acteurs clés du marché des granulats : producteurs, consommateurs et transporteurs. La filière complète a toutefois dû être appréhendée, car les interactions avec les autres acteurs sont nombreuses. C'est le scénario « construction du Grand Paris » qui a retenu l'attention des partenaires et des utilisateurs potentiels et qui a donc fait l'objet de simulations. Dans cette étude, les apports de l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la région IDF ont précisé les données recueillies. L'outil informatique développé par Mines ParisTech a été co-construit avec les autres partenaires du projet. Il a surtout bénéficié de la base de données des producteurs et des consommateurs régulièrement mise à jour par l'UNICEM. Dans ce cadre, le respect de la confidentialité des données individuelles a été garanti par sa fonctionnalité basée sur des données agrégées. Enfin, le département de Recherches en Économie Écologique de l'Université de Versailles a assuré la concertation entre les acteurs, les utilisateurs et les partenaires autour des scénarios envisagés et de l'outil de simulation pour faire émerger les points les plus intéressants ou ceux qui impactent le plus le marché des granulats en Île-de-France. Ainsi, les granulats recyclés, les granulats marins et le transport combiné ont été pris en compte dans les scénarios et dans l'outil de simulation. Leurs impacts ont pu être évalués sur la résolution du marché des granulats. L'analyse thématique ainsi développée a été mise en valeur par le biais d'une interface associée à l'outil créée par Andreil Game.

## Bibliographie

- BERKELAAR M., EIKLAND K. & NOTEBAERT P. (2004), "lp\_solve 5.5", *Open source (Mixed-Integer) Linear Programming system*, <http://lpsolve.sourceforge.net/5.5/>
- HAZELLE V., DOROSZCZUK B., DRESS P., GARCIA S., RAFA A. & TOURJANKY L. (2012), *La Soutenabilité du Grand Paris – L'approvisionnement en matériaux du Grand Paris*, DRIEE-IDF, 41 p.
- CORGET R. & ANSELME T. (2013), « Un modèle multimodal intégré pour la prévision des flux de marchandises du BTP », Congrès ATEC-ITS France « Mobilités et transports : évolutions majeures et perspectives d'avenir ».
- RODRIGUEZ CHAVEZ M.-L. (2010), *Anticipation of the access to the aggregate resource by breaking present schemes in the long term*, Thèse de doctorat ParisTech spécialité Technique et Économie de l'exploitation du sous-sol, Mines ParisTech, Centre de Géosciences, 135 p.
- RODRIGUEZ CHAVEZ M.-L., SCHLEIFER J., DUBUS J.-L., LEBRET P. & ANDRIAMASINORO F. (2010), "Innovative macroeconomic modelling techniques for the aggregates market", *Environmental Modelling and Software*, Elsevier, 11 p. <hal-00580712>
- TOUPIN A. (2004), *L'Extraction de granulats marins – Impacts environnementaux, Synthèse bibliographique critique*, La SIM, 188 p.
- CEREMA (2014), *Graves de valorisation – Graves de déconstruction*, guide Rhône-Alpes d'utilisation en travaux publics, direction territoriale Centre-Est, 23 p.
- Conseil régional d'Île-de-France (2013), *Schéma directeur de la région IDF – Île-de-France 2030*, Région IDF-IAU, 6 volumes et cartes.
- Conseil régional d'Île-de-France (2015), *Plan régional de prévention et de gestion des déchets issus des chantiers du bâtiment et des travaux publics (PREDEC)*, Région IDF, 257 p.
- DRIEE-IDF, IAU-IDF, UNICEM (2017), *Granulats en Île-de-France – Panorama régional*, Corlet, 76 p.
- UNPG (2012), *Situation, enjeux et perspectives du transport et de la distribution des granulats*, 27 p.
- Secrétariat général de la Mer (Version 2.1 – 18 mars 2006), *Extraction de granulats marins*, Document d'orientation pour une politique nationale.