

COMMENT RÉPARTIR LES SILLONS : UNE APPROCHE EMPIRIQUE FONDÉE SUR LA TECHNIQUE D'ENCHÈRES

Jean-Jacques BECKER, Paul MOREL¹

Comment un gestionnaire d'infrastructures ferroviaires pourra-t-il attribuer les sillons dans le contexte de multiplicité de transporteurs qui devrait résulter de l'ouverture du secteur à la concurrence ? Le mécanisme d'enchères permettrait de déterminer à la fois une répartition, a priori économiquement efficace, des sillons entre les différents utilisateurs, et leurs niveaux de tarification.

Le travail exploratoire présenté dans cet article, portant sur une fraction limitée du réseau ferré national, semble confirmer l'intérêt du mécanisme d'enchères. L'ordre des priorités des circulations ainsi obtenu est cohérent avec les règles administratives en vigueur.

Un des enseignements de l'analyse économique se retrouve par ailleurs empiriquement : un gestionnaire d'infrastructures recherchant son intérêt propre, la maximisation de son profit, prendrait des décisions de répartition qui seraient également conformes à l'intérêt collectif. En revanche, cette étude souligne la sensibilité des résultats aux pas des enchères. L'approche suppose par ailleurs une multiplicité de demandeurs, ce qui n'est pas le cas actuellement.

L'allocation des capacités de circulation entre différents usages ou opérateurs deviendra une question cruciale pour le gestionnaire d'infrastructures (GI), avec l'ouverture progressive du secteur ferroviaire à la concurrence, dans la mesure où des conflits entre utilisateurs (trains de grandes lignes, trains express régionaux - TER, fret, trafic périurbain) ne manqueront pas alors d'apparaître sur certains nœuds ou tronçons du réseau. Actuellement, ces conflits sont réglés en interne par l'opérateur historique, la SNCF.

En principe, sur les sections saturées, cette allocation des capacités s'effectue au moyen de règles de priorité réglementaires (*encadré 1*) : tout d'abord, les trains pour lesquels une infrastructure spécifique a été construite (TGV en particulier), puis les services de fret international sur le réseau transeuropéen du fret ferroviaire, ensuite les trains conventionnés par une autorité organisatrice (régions), enfin les autres circulations. Ce type de méthode ne garantit en aucune manière que la capacité rare soit mise à disposition des circulations les plus utiles du point de vue de la collectivité.

Le mécanisme d'enchères n'a guère été employé à ce jour pour l'attribution de sillons. Il l'a été pour l'attribution de marchés de services de transports de voyageurs (notamment au Royaume-Uni, trains et bus) ou dans d'autres secteurs, pour l'attribution de ressources rares comme le spectre hertzien dans les télécommunications (mise aux enchères des licences UMTS dans certains pays) ou les capacités d'interconnexion entre réseaux nationaux dans le secteur électrique (en France l'interconnexion avec le Royaume-Uni).

¹ Paul Morel est professeur au Laboratoire de Mathématiques Appliquées de l'Université de Bordeaux 1. Le présent article synthétise son étude « Optimisation de la répartition des sillons ferroviaires par la révélation des préférences des entreprises ferroviaires », financée par le SESP et réalisée dans le cadre de l'action de l'ADERA (Association pour le développement de l'enseignement et des recherches auprès des universités, des centres de recherche et des entreprises d'Aquitaine), mars 2006.

Encadré 1

Règle d'attribution des sillons ferroviaires en vigueur sur le réseau ferré national en France

Le décret du 7 mars 2003 relatif à l'utilisation du réseau ferré national précise dans son article 22 :

« Lorsqu'une section de ligne du réseau ferré national a été déclarée saturée conformément à l'article 26, Réseau ferré de France affecte les sillons en fonction de règles de priorité. Ces règles de priorité sont élaborées en cohérence avec les orientations de la politique générale des transports afin d'optimiser l'utilisation du réseau ferré national et d'assurer le développement équilibré de l'ensemble des services ferroviaires.

Sont ainsi prioritaires sur le réseau ferré national, dans l'ordre suivant :

1. les services nationaux ou internationaux qui, sur tout ou partie de leur trajet, sont effectués sur des lignes du réseau ferré national spécifiquement construites pour eux ;
2. les services de transport internationaux de marchandises sur les lignes du réseau ferré national appartenant au Réseau transeuropéen du fret ferroviaire défini à l'annexe du présent décret ;
3. les services effectués dans le cadre d'un contrat de service public passé avec une autorité organisatrice de transports. »

Une démarche empirique

La démarche retenue est empirique : il s'agit de reproduire, à l'aide d'un simulateur, des séquences de mise aux enchères de sillons sur une portion donnée de réseau. Elle se situe dans une perspective de long terme avec une multiplicité de demandeurs ; elle n'est pas applicable en présence d'un transporteur détenant une position dominante. Les infrastructures sont allouées à des opérateurs ferroviaires qui attribuent une valeur économique aux sillons, correspondant aux revenus nets escomptés des services qu'ils peuvent ainsi proposer. Cette valeur représente a priori le prix maximal qu'ils sont prêts à payer pour en disposer. Ces informations économiques ne sont a priori pas connues du gestionnaire d'infrastructures et c'est au travers de la procédure d'enchères qu'elles seront révélées. Ce type de mécanisme, faisant appel au fonctionnement du marché, détermine donc simultanément la répartition des sillons et leurs niveaux de tarification.

Cependant, les résultats obtenus sont très sensibles aux pas d'enchères, point qui nécessiterait des investigations complémentaires. Ce travail mériterait également d'être prolongé dans d'autres directions : modélisation d'un réseau plus étendu, simulation d'autres formes d'enchères, comportements stratégiques des opérateurs...

La mise en œuvre pratique n'est pas examinée ici, même si elle pose des problèmes abondamment discutés dans la littérature : comportements non concurrentiels, asymétries d'information, problématique particulière des enchères combinatoires ou liées²...

² Un sillon Paris-Marseille n'a que peu de valeur si le transporteur ne dispose pas des sillons dont il a besoin pour faire remonter le train à Paris

FERROVIAIRE

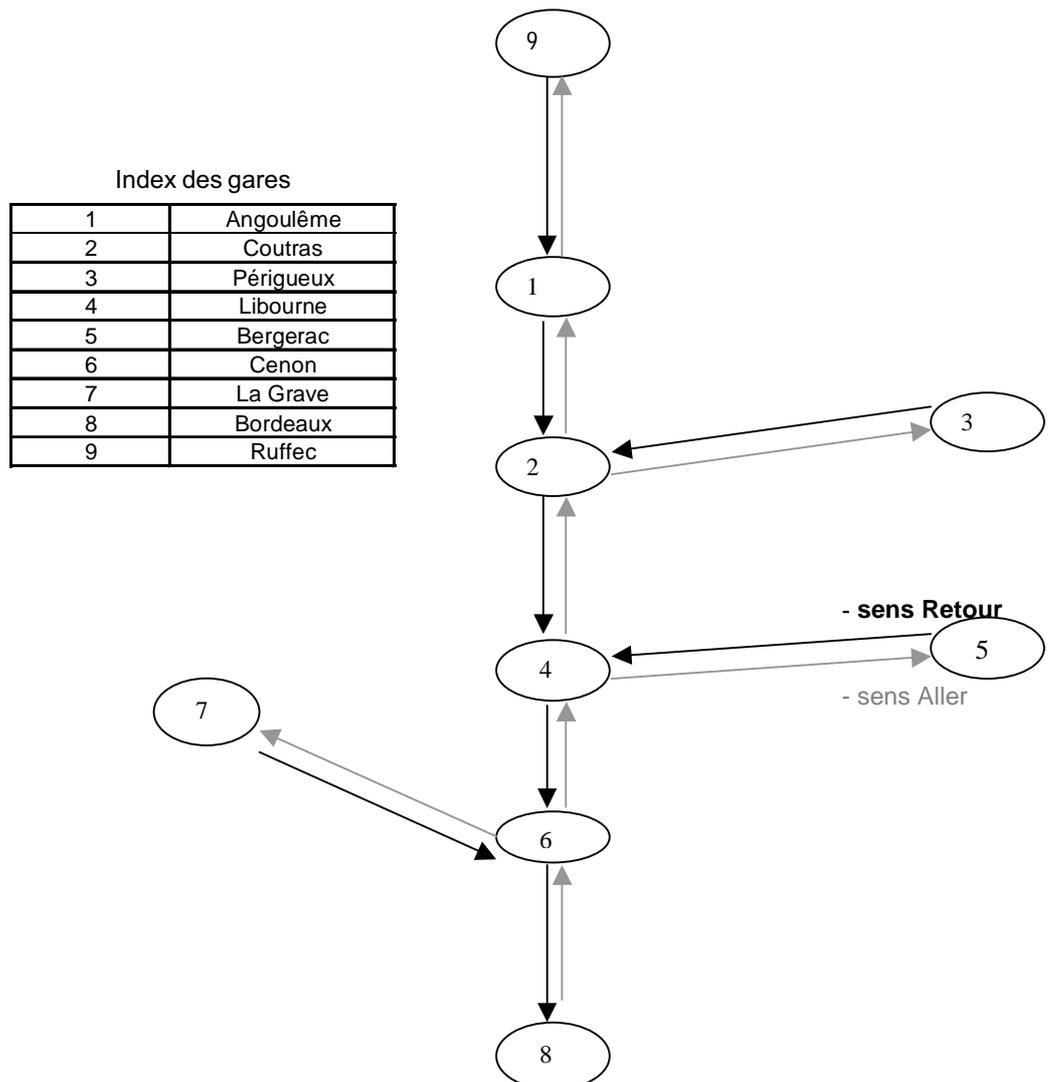
L'essentiel du réseau modélisé

La modélisation concerne les nombreux paramètres dont dépend la capacité du réseau, comme les pentes des sillons alloués (vitesses moyennes des trains), leur hétérogénéité et le positionnement horaire des trains. Il faut aussi prendre en considération la composante réseau, car l'allocation d'un sillon en un point du réseau peut avoir des répercussions globales dans l'espace et dans le temps, à la différence d'une infrastructure se limitant à un seul maillon (aéroport, tunnel) qui permet de se limiter à une enchère simple.

La solution retenue est d'assimiler l'ensemble des voies du réseau à un graphe dont les « nœuds » (tels les gares, les points de changement d'allure) sont des points caractéristiques et dont les « arcs » sont les tronçons de voie. Chaque arc possède ses caractéristiques propres. Le réseau n'est pas représenté dans toutes ses finesses mais pour ses seules voies principales. Les gares sont réduites à un nœud et les problèmes d'accès ne sont pas pris en compte de manière spécifique. Cette simplification réduit la complexité du réseau sans conséquence majeure sur les objectifs visés : les goulots d'étranglement qui sont en général localisés sur les voies principales à proximité des grandes agglomérations sont pris en compte.

Le cas traité est celui du nord de l'agglomération de Bordeaux qui s'étend jusqu'à la ville de Ruffec (figure 1).

Figure 1 - Structure du réseau modélisé



Source : Adera

FERROVAIRE

Une dynamique des circulations réaliste

La modélisation distingue cinq types de circulations : TGV, TER conventionné, TER non conventionné, fret rapide, fret lent, défini chacun avec sa vitesse idéale de circulation, c'est-à-dire maximale. Le trajet de chaque circulation est fixé. Chaque tronçon est supposé parcouru à vitesse constante, les accélérations et les freinages ne sont pas pris en compte. La vitesse effective d'une circulation sur un tronçon est une inconnue qui dépend des autres demandes de capacité et qui sera déterminée par le calcul. Dans le plan espace-temps traditionnel, la trajectoire d'une circulation est une suite de segments adjacents formant une fonction continue monotone non décroissante. Les horaires idéaux de départ, souhaités par les transporteurs, sont également une donnée. Ils permettent le calcul, avant optimisation, des horaires idéaux des départs et arrivées de chaque circulation sur chaque gare visitée.

Le fonctionnement du réseau obéit à des consignes impératives. La principale est que sur un tronçon quelconque deux circulations ne peuvent ni se doubler ni se croiser. Les doubléments ne peuvent se réaliser qu'au niveau des gares (supposées dotées de voies d'évitement). Par ailleurs, une distance de sécurité, en temps ou en espace, est garantie entre deux circulations (fixée à 4 minutes dans les simulations réalisées). Sont introduites en sus des contraintes pour mieux « coller » à la réalité des trafics ferroviaires : pas de « désheurages » (c'est-à-dire modification des horaires par rapport aux demandes des transporteurs), ni de ralentissements importants sur les TGV. En revanche, des laps de temps pouvant être infinis sont accordés pour le fret lent, en ralentissement et désheurage. Certaines circulations peuvent, le cas échéant, être supprimées.

Du point de vue algébrique, l'ensemble de ces contraintes s'exprime linéairement par rapport aux variables qui décrivent les trajectoires réelles des circulations, c'est-à-dire les heures de départ et les heures d'arrivée dans chaque gare. Les autres variables de décision correspondent à l'ordre entre les circulations et aux variables booléennes (de type oui/non) indiquant si elles sont maintenues ou supprimées.

Des acteurs économiques guidés par leur utilité

Le modèle considère les acteurs suivants : les « clients finaux » (chargeurs ou voyageurs), les « transporteurs », le « gestionnaire d'infrastructures », qui tous disposent d'une fonction d'utilité représentative de leurs comportements.

Le « client final » n'est en relation qu'avec le « transporteur ». Il perçoit une utilité, liée à l'intérêt de son déplacement (voyageur) ou fixée par le marché (chargeur). Le modèle utilise une valeur moyenne pour chaque circulation, qui correspond au chiffre d'affaires de la circulation (*tableau 1*).

Tableau 1 - Valeurs moyennes de l'utilité liée au déplacement pour le client final, selon le type de circulation

Convois	Utilité liée au déplacement (en euros/train)
TGV	14 286
TER non conventionné	685
Fret rapide	7 500
Fret lent	1 929

Source : MTETM/SESP

Un second gain pour le « client final » peut venir du « transporteur » : si le sillon obtenu par le transporteur est actif mais dégradé, celui-ci ristourne au client un certain montant qui est proportionnel au niveau de « désheurage » (décalage par rapport à l'horaire initialement prévu) ou de ralentissement subi. En revanche si la circulation ne peut être réalisée, le transporteur ne ristourne rien, mais le client final verse au marché une pénalité de suppression fixée à 20 % de la recette

FERROVIAIRE

initiale. En matière de dépenses, le client final doit s'acquitter du prix du transport, payé au transporteur, qui, dans le modèle, est fixé forfaitairement à 90 % du chiffre d'affaires de la circulation.

Les transporteurs sont en relation avec le client final et le gestionnaire d'infrastructures. La fonction d'utilité de chaque transporteur s'écrit comme suit : en positif, le prix du transport, éventuellement diminué d'une ristourne en raison de la baisse de qualité du sillon obtenu in fine, et, en négatif, le coût du transport (essentiellement coût de possession du matériel et coût de personnel) et le prix du sillon. Le coût de transport n'est jamais nul car, même si la circulation n'a pas lieu, le coût de possession existe toujours. Est retenue une relation linéaire décrivant le coût de transport en fonction de la longueur du trajet et du temps pour l'effectuer.

Le « gestionnaire d'infrastructures » est en relation avec les « transporteurs ». Son utilité s'exprime ainsi : si la circulation est active, il perçoit le prix du sillon versé par le transporteur et supporte un coût d'usure de la voie.

Tableau 2 - Utilités des acteurs économiques et utilité collective dans un mécanisme d'enchères pour la répartition de sillons ferroviaires

Acteur	Utilité
CLIENTS FINAUX (voyageurs ou chargeurs)	utilité liée au déplacement (voyageur) ou liée au marché (chargeur) + éventuellement gain venant du transporteur (ristourne pour sillon dégradé) - prix du transport - pénalité versée au marché si la circulation ne peut être réalisée
TRANSPORTEURS	prix du transport (- ristourne éventuelle au client si le sillon est dégradé) - coût du service de transport et prix du sillon
GESTIONNAIRE D'INFRASTRUCTURES	prix du sillon attribué - coût d'usure de l'infrastructure
UTILITE COLLECTIVE	Somme des utilités * si la circulation est réalisée : valeur du service de transport (- ristourne éventuelle pour sillon dégradé) - coût réel (coût du service ferroviaire et coût d'usure de l'infrastructure) * si la circulation n'a pas lieu (résultat négatif) : pénalité de suppression de circulation (supposée supportée par le chargeur) + coût du service supporté par le transporteur

Source : MTETM/SESP d'après Adera

L'utilité collective est définie comme la somme des utilités de ces trois acteurs (tableau 2). Si la circulation est réalisée, celle-ci est égale à la différence entre la valeur du service de transport (éventuellement réduite en cas de dégradation de la qualité du service) et son coût réel, égal à la somme entre le coût du service ferroviaire (possession du matériel et coût du personnel) et le coût d'usure de l'infrastructure. Si la circulation n'a pas lieu, l'utilité collective est négative : elle correspond au coût supporté par le chargeur (pénalité de suppression) augmenté du coût du service pour le transporteur (qui est considéré comme un coût fixe).

La répartition des circulations sur le réseau est décidée par le gestionnaire, guidé par un objectif de maximisation de son utilité. Des simulations ont également été réalisées pour un gestionnaire dont le critère de décision serait la maximisation de l'utilité collective.

Une utilisation optimisée du réseau

Les résultats de la modélisation sont conformes à l'intuition : les suppressions ont lieu sur les TER non conventionnés, les TGV étant quasiment toujours assurés de circuler. De même, les permutations des horaires de départ se réalisent de manière réaliste : il y a « mise en batterie », c'est-à-dire regroupement de

circulations de vitesses similaires destinées à économiser la capacité utilisée. Le mécanisme d'enchères permet donc d'identifier les solutions techniques optimisant l'utilisation de la capacité du réseau.

La complexité numérique du modèle peut conduire à opter pour des solutions approchées (*encadré 2*). Le choix des solutions approchées a des répercussions lors du traitement des enchères.

Encadré 2

La complexité numérique du modèle

Les utilités des acteurs économiques telles qu'elles ont été spécifiées s'écrivent comme des formes linéaires par rapport aux variables de décision, de même que les contraintes d'un fonctionnement conforme aux consignes de signalisation. Dans ces conditions, la maximisation de l'utilité du gestionnaire d'infrastructures (ou de l'utilité collective), sous les contraintes de fonctionnement, se ramène à un problème d'optimisation linéaire en variables réelles ou entières. La taille du problème est significative : le nombre de variables augmente comme le carré du nombre de circulations en jeu, tandis que le nombre de contraintes est une fonction linéaire du nombre de tronçons. L'optimisation est réalisée à l'aide de l'algorithme du Simplex.

La procédure d'optimisation en nombres entiers génère des problèmes de complexité numérique. Pour les instances maximales qui sont traitées (le réseau principal étant celui des voies principales du sud-ouest de 220 tronçons et 34 gares avec des circulations au nombre de 3), le résultat optimal s'obtient en quelques minutes, lorsque les horaires idéaux sont bien positionnés, c'est-à-dire qu'il n'y a pas trop de circulations en compétition. À l'inverse dans le cas d'horaires en compétition les uns avec les autres, les temps de calcul deviennent prohibitifs même pour des instances plus faibles. Il convient alors de recourir à des solutions approchées, choix pouvant avoir des répercussions au niveau du traitement des enchères.

La transparence pour révéler les disponibilités à payer

Le processus de révélation des disponibilités à payer des transporteurs au gestionnaire, repose sur une procédure transparente connue par les opérateurs. Elle est itérative, chaque tour correspondant à une affectation optimale d'horaires par le gestionnaire, compte tenu des prix proposés par les différents transporteurs. Le résultat de chaque tour d'enchères est communiqué de manière privée à chaque transporteur, qui décide alors de renchérir ou non. Les clients sont absents du processus. La liste des circulations en concurrence est fixée *ex ante* pour l'ensemble des enchères. Suivant l'avancement du processus, les circulations apparaissent comme actives, c'est-à-dire retenues dans le programme du gestionnaire ou supprimées.

Le transporteur enchérit en augmentant la valeur proposée pour leurs sillons ou en acceptant des valeurs de ristournes en diminution (procédure d'enchères ascendantes). Il détermine la valeur maximale d'un sillon à l'aide du revenu maximal qu'il en espère. Sa capacité à surenchérir pour obtenir un sillon convoité est supposée étroitement encadrée par les conditions financières imposées par le client final. Le gestionnaire choisit des mises à prix initiales très basses, de l'ordre du coût d'usure des voies pour chaque circulation, de manière à ce que son utilité soit à peine positive. Il fixe les valeurs unitaires, maximale et minimale, pour les ristournes.

Pour représenter une situation plus conforme à la réalité, les modifications des prix sont prévues par addition, à une valeur déterministe fixe, d'un aléa tiré suivant une loi uniforme ayant pour support un intervalle symétrique centré sur la valeur déterministe. Les quantités déterministes qui forment la part prépondérante des pas d'enchères sont différentes pour chaque type de convoi.

FERROVAIRE

À chaque tour d'enchères le gestionnaire calcule les horaires théoriques, les ralentissements, les désheurages, les pénalités qui y sont attachées, et la suppression éventuelle de circulations, qui maximisent son utilité. Pour cela, il faut résoudre le programme linéaire en nombres entiers précédemment évoqué. Il y aura autant d'appels à cet algorithme qu'il y aura de tours d'enchères. Chaque transporteur calcule alors un taux de satisfaction qui est le quotient entre le bénéfice correspondant aux affectations proposées par le gestionnaire et le gain initialement espéré. Si le transporteur est satisfait (taux de satisfaction égal ou supérieur à 80 %), il ne modifie pas ses propositions de prix. S'il n'est pas satisfait et qu'il peut renchérir, il les modifie en conséquence.

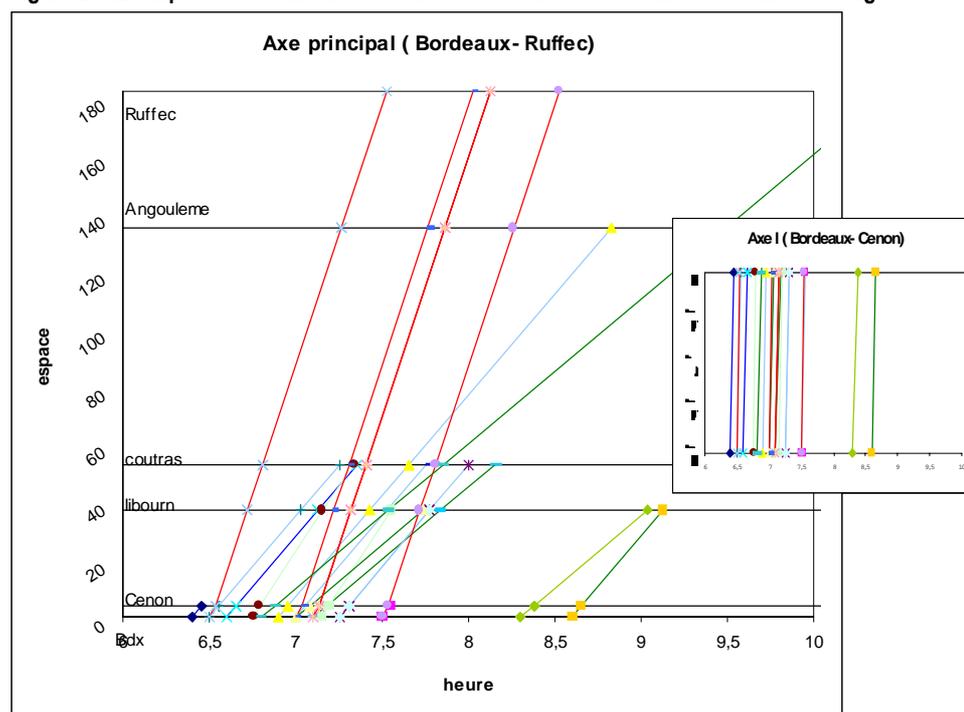
Différentes fins de processus possibles

Les tests d'arrêt sont de plusieurs types. Le premier consiste à fixer un nombre maximal de tours d'enchères. S'observe alors un comportement assez surprenant : les premiers tours voient une évolution régulière des utilités, mais lors du dernier tour chacune des circulations non satisfaites a la possibilité d'engager toutes ses disponibilités financières. Ceci provoque un saut parfois brutal dans les utilités : un TGV non maintenu à l'avant-dernier tour impose sa présence lors de la dernière enchère. Un autre test d'arrêt peut être une augmentation insuffisante des niveaux d'enchères, chaque acteur étant arrivé au bout de ses possibilités financières. Ce cas intervient assez fréquemment lorsque les pas sont trop grands. Un troisième test d'arrêt consiste à stopper le processus si tous les transporteurs sont satisfaits. Le programme final contient la concaténation de ces trois tests.

Des conflits d'usage résolus

Les simulations portent sur le réseau du nord de Bordeaux, dans le sens Nord Sud uniquement : sur ces lignes, toutes les voies sont doublées sans cisaillement, ce qui découple complètement les flux montant et descendant. La fenêtre d'étude est l'heure de pointe du matin. Les listes des circulations tentent de respecter les proportions des cinq types de convois envisagés. Les horaires idéaux sont choisis de manière à générer des conflits d'usage (*figure 2*). Les demandes sont à chaque fois surabondantes par rapport à la capacité du réseau.

Figure 2 - Exemple de schéma de circulations « idéales » illustrant les conflits d'usage

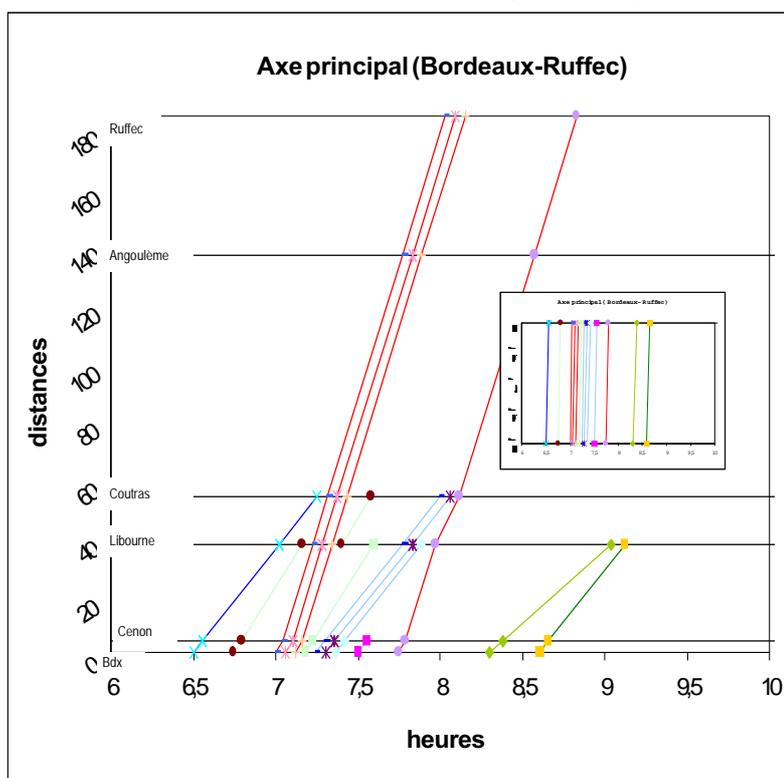


Source : Adera

FERROVIAIRE

L'arrêt de la séquence d'enchères est souvent provoqué par le nombre maximal de tours permis. Mais à ce stade le nombre de circulations en activité est quasi constant, proche de la saturation du réseau. Si, après plusieurs tours, le nombre de circulations est quasi constant, les circulations effectivement actives ne sont pas toutes stabilisées. Les TGV s'installent ou entrent en compétition pour la capacité, le fret lent est en général supprimé, les TER conventionnés sont soumis à des changements d'horaires (figure 3).

Figure 3 - Exemple de schéma de circulations « optimales » après résolution des conflits d'usage



Source : Adera

Sur le réseau étudié toutes les circulations sont astreintes à une limitation de vitesse sur le premier tronçon (sortie du goulot bordelais). L'algorithme tente de mettre « en paquets » les TGV pour ne pas les désheurer ni les retarder, mais ces derniers doivent tout de même laisser de la capacité aux TER conventionnés. Les TGV doublent le fret rapide ou lent en l'obligeant à stopper dans des gares intermédiaires.

Des résultats sensibles

Les résultats sont sensibles au choix des pas d'enchères. Si les pas sont grands avec un nombre fixé de tours (par exemple de 600 € pour un TGV), les accroissements des mises peuvent rapidement devenir insignifiants et le processus s'arrête par épuisement prématuré des ressources. Par ailleurs, les pas doivent être personnalisés pour chaque type de circulation afin d'éviter les variations trop brusques des utilités. Les valeurs conduisant à une évolution plus régulière de l'utilité du gestionnaire, sans saut à la dernière enchère sont identifiées par tâtonnement ; elles varient de 300 € pour les TGV à 50 € pour le fret lent.

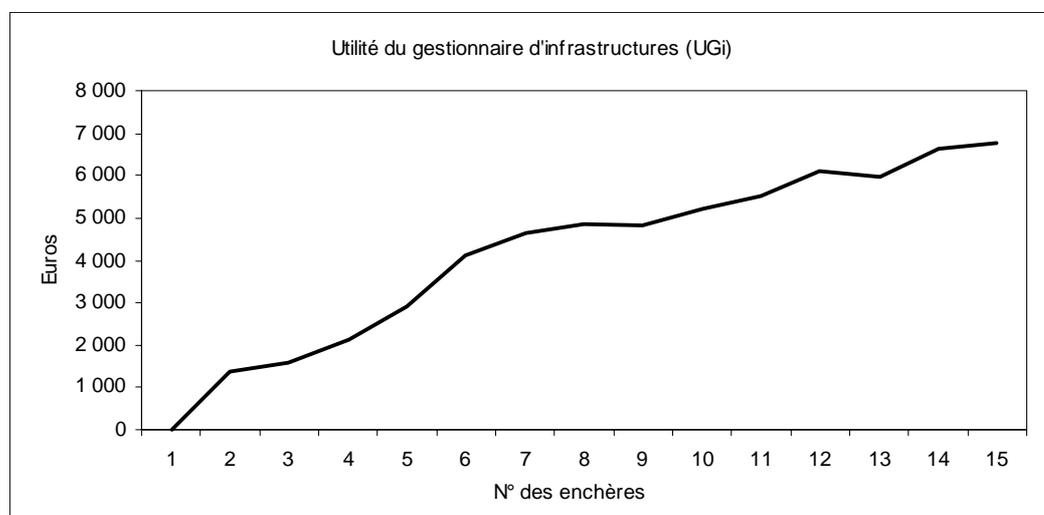
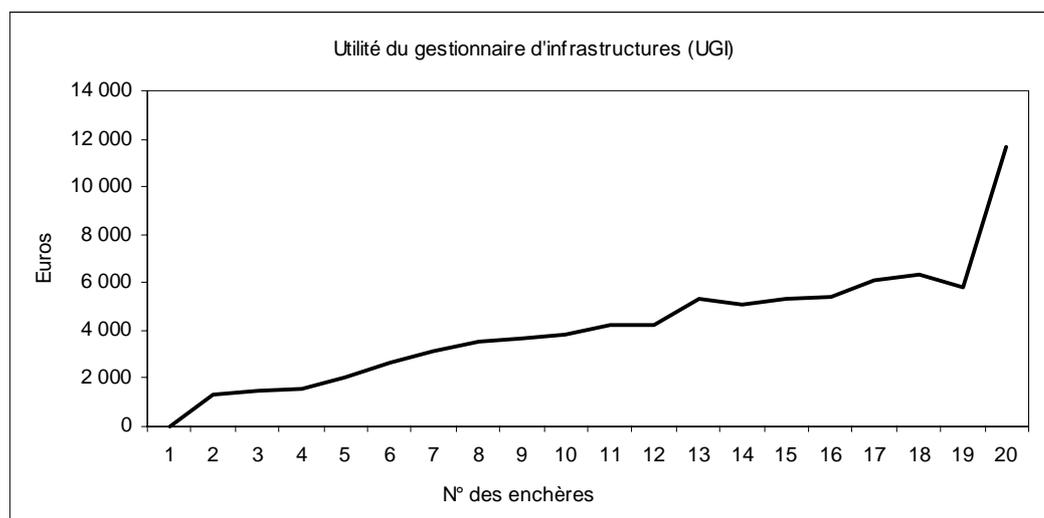
Le réalisme de la modélisation peut être testé en suivant l'activation ou la suppression des divers types de circulations tout au long du processus : un TGV s'installe rapidement dans la liste qui sera définitivement retenue, à moins d'être

FERROVIAIRE

en conflit avec un autre TGV. Sur une vingtaine de tours, les TGV apparaissent dès le début du processus et n'en disparaissent pas. Le fret lent est assez rapidement supprimé, après trois ou quatre tours.

Par ailleurs, les résultats sont sensibles aux valeurs des aléas introduits dans les accroissements des enchères proposées par les transporteurs (*figure 4*). Cette question de la robustesse des résultats obtenus par une procédure d'enchères mériterait d'être examinée plus en détail.

Figure 4 - Deux simulations réalisées avec deux tirages d'aléas différents, illustrant la grande sensibilité des résultats obtenus



Le graphe de l'utilité du gestionnaire, qui devrait être strictement croissant, est parfois un peu perturbé car des résolutions approchées ont été retenues pour accélérer les tours d'optimisation.

Source : Adera

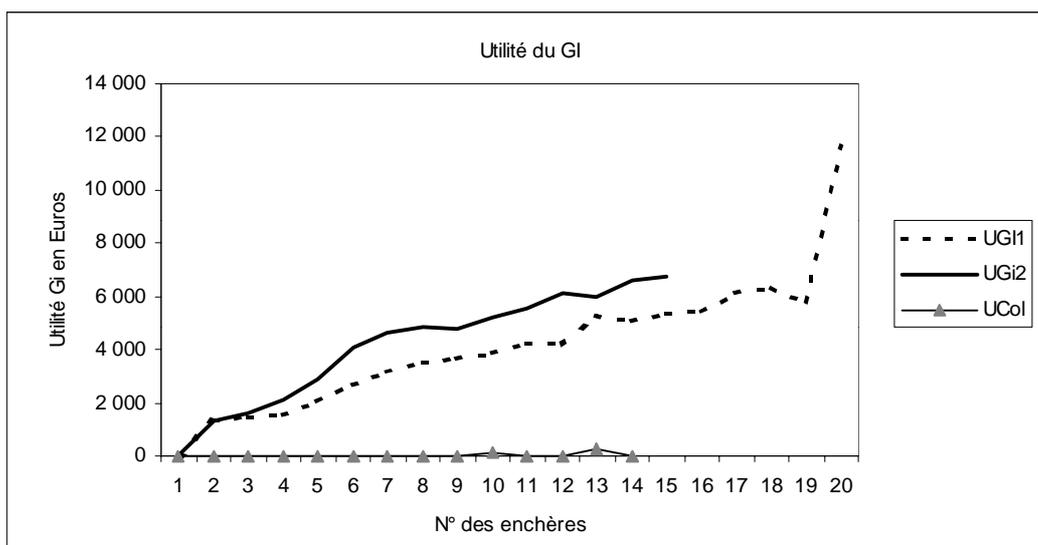
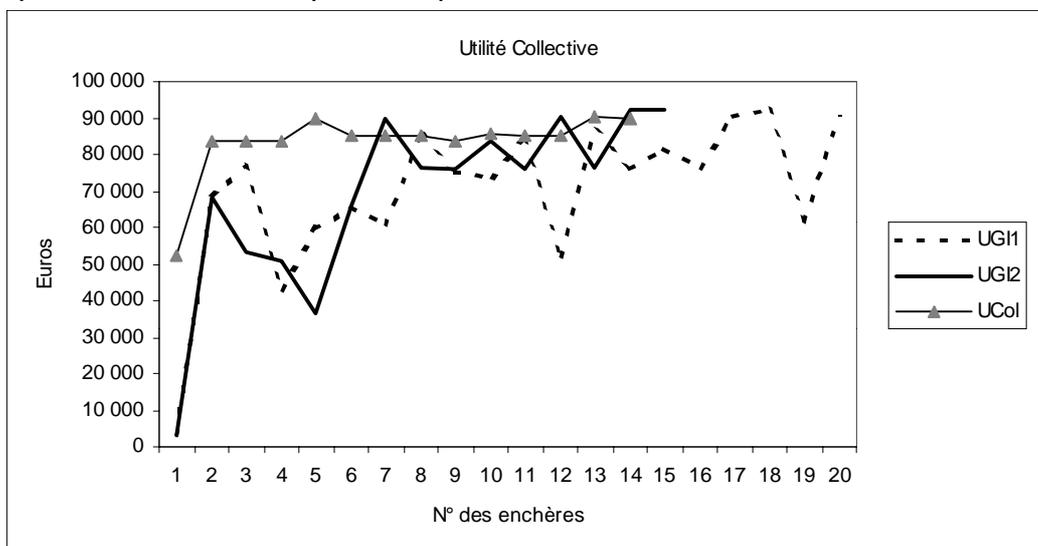
La faisabilité du processus d'enchères

Les résultats diffèrent lorsque la procédure d'enchères est guidée par la maximisation de l'utilité collective à la place de celle de l'utilité du gestionnaire d'infrastructures. En particulier l'utilité du gestionnaire est beaucoup plus faible, au profit des transporteurs notamment. En revanche, le niveau de l'utilité collective semble peu affecté : les écarts correspondent à des artefacts de calcul (pas aléatoires différents et recherche de solutions approchées pour limiter les temps de calcul). Optimiser l'utilité du gestionnaire des infrastructures apparaît donc comme un choix acceptable du point de vue de l'intérêt collectif.

FERROVIAIRE

En revanche, la répartition de la rente de rareté est très dépendante du critère que l'on cherche à optimiser.

Figure 5 - Évolution au cours du processus d'enchères, des valeurs des utilités collectives lors de deux simulations de l'optimisation de l'utilité du gestionnaire, et la valeur de l'utilité collective lors d'une optimisation avec les mêmes paramètres que l'utilité collective



Source : Adera

Le rapport d'étude de Paul Morel « Optimisation de la répartition des sillons ferroviaires par la révélation des préférences des entreprises ferroviaires » est disponible sur www.statistiques.equipement.gouv.fr, rubrique « Publication/ Document de travail ».