

La transition vers l'électrique pour des milliers de bus à la RATP : la puissance du numérique au service d'un projet titanesque

Par **Agathe BASTIT** et **Felix von PECHMANN**
RATP

Introduction

Remplacer à grande échelle son outil principal de production par une technologie naissante, en mode accéléré, avec un investissement colossal – c'est une décision que l'on ne prend pas souvent et que l'on met encore moins souvent en œuvre avec succès. Voici le récit d'une de ces décisions, et de quelques éléments ayant contribué à son succès.

La RATP a décidé en 2014, avec Île-de-France Mobilités, de remplacer l'intégralité de son parc d'autobus⁽¹⁾, en moins de dix ans, par des bus électriques et biogaz, en créant au préalable toute l'infrastructure pour leur alimentation en énergie. Les investissements dépassent largement le milliard d'euros, et le projet a été qualifié de « pharaonique » ou de « titanesque » par certains acteurs en interne à son lancement. Permettant une réduction de 50 % des émissions de gaz à effet de serre de l'entreprise, c'est un projet technologique et écologique majeur, mais c'est aussi un grand défi organisationnel, car il révolutionne le modèle industriel d'exploitation et de maintenance des bus, en particulier pour la partie électrique, sur laquelle nous nous concentrerons dans cet article.

Cette décision d'électrification d'une grande partie de la flotte de bus a été prise alors que la technologie n'en était qu'à ses premiers pas en Europe. Aucun réseau de transport n'avait d'expérience significative de conversion à l'électrique dans un milieu urbain aussi dense que celui de la métropole parisienne. Or, l'électrification d'une flotte de véhicules ne se fait pas en remplaçant des moteurs thermiques par des moteurs électriques. Le développement d'un service de transport public électrique génère un changement de paradigme de l'ensemble des variables constituant le système de transport : les bus, les infrastructures énergétiques associées permettant de les exploiter, la conception et l'activité des dépôts qui les maintiennent, les processus... L'autonomie des bus, presque illimitée avec des moteurs diesel, doit être contrôlée et pilotée ; le ravitaillement des bus la nuit, qui prenait quelques minutes en diesel, dure désormais environ cinq heures.

Si l'intégration de ces contraintes pouvait se résoudre en augmentant le nombre d'autobus, l'objectif du programme était d'opérer la transition énergétique de la flotte d'autobus à nombre de bus constant.

Dans cet article, nous illustrerons en quoi le recours au numérique a été indispensable pour mener à bien une telle transition d'un système quasi-modulaire à un système intégré. D'autres facteurs ont contribué au succès du projet, et une partie a d'ailleurs déjà été documentée (von Pechmann et Midler, 2019). Nous verrons comment une phase d'anticipation a permis d'établir la faisabilité technique en créant des outils de simulation numérique. Nous verrons ensuite que le déploiement, qui s'est fait dans des dépôts en exploitation, s'est appuyé sur l'implication de nombreux acteurs, équipés d'outils d'analyse numérique créés pour l'occasion.

(1) Le parc d'autobus de la RATP comprend 4 700 véhicules répartis dans 25 dépôts situés principalement dans Paris et sa petite couronne.

Anticiper par la simulation

Dans les phases en amont du programme, le recours à la simulation, et au traitement massif de données, a permis de mieux concevoir le système, de rassurer les parties prenantes et d'anticiper les moyens à mettre en œuvre pour un déploiement à grande échelle. Nous évoquerons trois analyses structurantes, menées de manière concourante dans les premières phases du programme : l'analyse du mode de charge, du fonctionnement d'un dépôt de bus, et de l'autonomie compte tenu de l'exploitation quotidienne.

Un choix structurant : la recharge de nuit, au dépôt de bus

Si certains réseaux de transport ont fait le choix de la recharge des véhicules en terminus, les premières études montraient que cette solution ne pouvait pas convenir pour recharger les autobus électriques du réseau de la RATP. D'une part, les contraintes spatiales en milieu urbain rendent l'insertion de systèmes de charge délicate : une importante densité de bâtiments classés, des terminus avec peu d'emprise au sol, la grande quantité de terminus à équiper. D'autre part, l'exploitation quotidienne dans le milieu urbain dense de la région parisienne apparaissait comme peu compatible avec une recharge en terminus : les bus ne stationnent parfois que quelques instants en terminus, et des aléas (manifestations, travaux, déviation...) conduisent régulièrement à des modifications de parcours ne permettant pas aux bus d'arriver jusqu'en terminus.

Les premières analyses ont donc porté sur les temps de présence des autobus au dépôt la nuit, pour s'assurer qu'ils pourraient être rechargés. Elles ont montré que la plupart des véhicules sont disponibles entre quatre et six heures par nuit pour être rechargés, ce qui a permis de pré-valider la piste de recharge de nuit. Assez tôt, le choix s'est donc porté sur la recharge nocturne des véhicules au dépôt, une option qui permettait de préserver une grande partie de la flexibilité d'exploitation du mode bus⁽²⁾. À l'époque, cette option allait à l'encontre des choix technologiques de nombreux fabricants qui préféraient intégrer moins de batteries à leurs véhicules, ce qui demandait des modifications moindres par rapport aux véhicules diesel.

Le réseau électrique tiendra-t-il ? Un simulateur de dépôts de bus

En parallèle, l'ingénierie interne et les distributeurs d'électricité voulaient s'assurer que près de 15 centres bus alimentant de nuit plus de 2 000 bus n'allaient pas plonger dans le noir la population francilienne. Il fallait aussi vérifier que le courant pourrait être acheminé jusqu'aux dépôts. De cette question cruciale dépendait le nombre de câbles devant être tirés depuis les postes de distribution de l'électricité ainsi que le choix de ces derniers. L'enjeu était de taille puisque la pose des câbles engendrerait des fouilles importantes sur la voie publique. On sait aujourd'hui qu'elles avoisinent les 100 kilomètres.

La réponse à la question n'était pas évidente. Une simple multiplication du nombre de bus par la puissance de charge maximale d'un bus aurait conduit à une large surestimation de la puissance de raccordement nécessaire. L'équipe projet décide donc de créer un simulateur afin de répliquer intégralement le fonctionnement d'un dépôt : les heures de rentrée et de sortie de chaque bus, les lignes, les distances parcourues, les lieux de stationnement au sein du centre... De nombreuses simulations ont été réalisées pour chaque dépôt et chaque journée type d'exploitation, dépendant notamment de la saison et de la période de la semaine. Elles ont été affinées selon plusieurs hypothèses d'affectation des bus aux courses de la journée, et de logiques de pilotage de la charge.

(2) Flexibilité par rapport aux modes ferrés, très liés à l'infrastructure, ce qui permet de déployer ou de modifier une ligne de bus beaucoup plus rapidement qu'une ligne de tramway ou de métro.

Ces travaux de modélisation ont permis de rassurer sur le déploiement à grande échelle. S'il s'agit d'un projet d'ampleur pour le réseau électrique en Île-de-France, la recharge de bus électriques est compatible avec le réseau de distribution en place. L'intégration des bus électriques se fait de manière très fluide, grâce à des complémentarités entre les moments d'utilisation du réseau électrique et du réseau de transport. Lorsque les voyageurs dorment, ils consomment peu d'électricité et ne prennent pas les transports. Les bus sont donc en grande partie garés en dépôt et peuvent être rechargés dans des périodes creuses pour le réseau électrique.

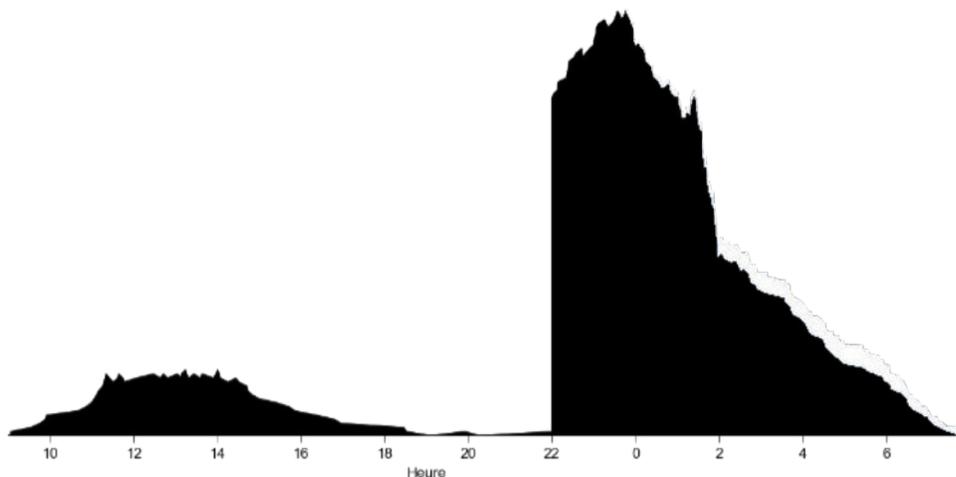


Figure 1. Exemple de courbe de charge pour un centre modélisé, avec un pilotage minimisant la puissance soutirée avant 22 h (Source : études RATP)

Les études ont montré que, pour garantir la charge des véhicules, la puissance de raccordement est de l'ordre de 10 à 15 MW par centre bus, en fonction du nombre de véhicules, la typologie des lignes et de l'offre de transport⁽³⁾. Un pilotage de la charge permet de positionner les pics de puissance la nuit entre 23 h et 4 h du matin, qui correspond à une période creuse pour le réseau électrique. C'est un des avantages de la recharge de nuit par rapport aux recharges ponctuelles en journée aux terminus : ces derniers sollicitent le réseau électrique tout au long de la journée, lorsqu'il est déjà contraint, notamment en région parisienne.

Les bus auront-ils assez d'autonomie ? Un simulateur d'exploitation et des mesures expérimentales

Une troisième question inquiétait à juste titre, et a été investiguée en parallèle des deux précédentes : comment s'assurer que l'ensemble des bus auront suffisamment d'autonomie pour réaliser leur service ? Comment tenir compte des nombreux aléas quotidiens (manifestations, déviations, travaux...) ? Le bus diesel offrait une autonomie quasiment illimitée pour un temps de « charge » de quelques minutes. La diminution de souplesse devait donc être compensée par une meilleure planification.

En principe, les conditions d'exploitation du bus urbain font de lui un excellent candidat pour l'électrification. Contrairement à certains véhicules particuliers, qui servent pour aller faire les courses, mais aussi pour partir en vacances, les bus urbains opèrent quotidiennement dans un environnement connu à l'avance, sur des distances sensiblement similaires et selon un mode planifié. En optimisant la planification, on peut ainsi simultanément s'assurer que les batteries

(3) Et donc des heures de rentrée et de sortie des bus, et des kilomètres parcourus en journée.

seront suffisantes pour les trajets planifiés et maximiser leur utilisation. Encore fallait-il s’assurer de la faisabilité en pratique.

Pour anticiper ces questions, des simulations d’exploitation de la flotte électrique ont été conduites, en combinant des mesures sur véhicules électriques, des données réelles issues de l’exploitation des bus thermiques, et les trajets planifiés théoriquement jour par jour, ligne par ligne ⁽⁴⁾. Ces études ont permis de mesurer finement les modifications à apporter à certains trajets, notamment pour mieux répartir les distances parcourues. Il s’agissait là d’une opération nouvelle pour les experts et les logiciels employés, cette contrainte n’existait pas pour les véhicules thermiques. Un bus diesel pouvait parcourir 140 km un jour, et 240 km un autre. Pour un bus électrique, il est préférable de parcourir 190 km les deux jours. Les apprentissages collectifs de cette période, et les méthodes de simulation numérique déployées, démontrent qu’il était possible d’électrifier la flotte de bus sans augmenter sa taille.

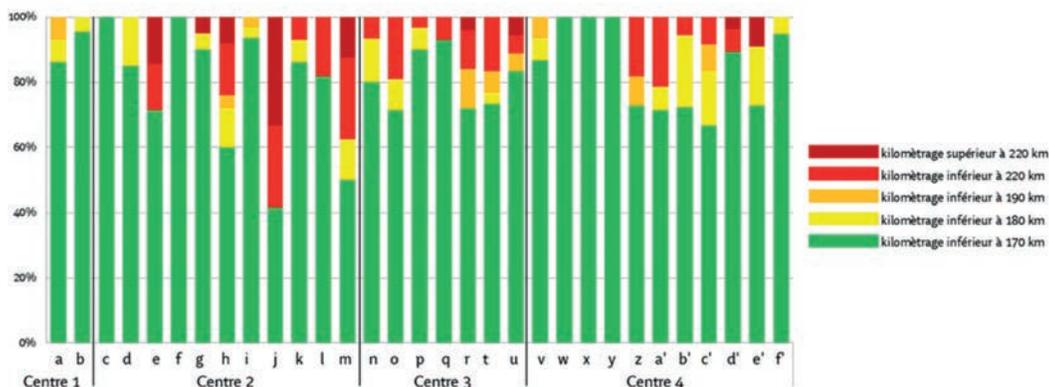


Figure 2. Exemple d’analyse de distances quotidiennes parcourues pour chaque ligne d’un centre bus (Source : études RATP)

Ces analyses ont aussi permis de mieux piloter le déploiement de lignes de bus électriques, en privilégiant dans un premier temps des lignes avec de meilleurs taux de compatibilité.

Les différents simulateurs ont servi au-delà des phases de conception en amont. Avec le déploiement des premiers autobus électriques dès 2016, de nombreuses données ont été enregistrées et analysées afin d’affiner les simulations.

Ces boucles actives d’apprentissage ont permis à la RATP de maîtriser progressivement les aspects liés à l’autonomie, et de faire croître le nombre de bus électriques sur le réseau. Aujourd’hui, elle arrive même à faire circuler des bus électriques sur des services de nuit, les Noctiliens. Dans la continuité des études en amont, des études fines d’affectation des véhicules sur les services ont été réalisées et ont permis le déploiement de bus électriques sur les premiers services de nuit, et cela sans acheter de bus supplémentaires.

Les compétences internes en traitement de données, ainsi que les progrès des outils de mesure et des capacités de calcul, ont permis de mener ces travaux à un rythme soutenu, et illustrent à nouveau comment les progrès du numérique peuvent avoir des effets majeurs sur le déploiement de disruptions systémiques (von Pechmann et Midler, 2019).

(4) Trajets planifiés dans ce qui s’appelle un « tableau de marche ».

Déployer en organisant l'apprentissage

Le déploiement des bus a été organisé de manière progressive, pour permettre l'apprentissage tout en garantissant une exploitation fluide pour les clients. Il a énormément bénéficié des travaux de planification en amont, mais aussi des capacités de traitement et d'analyse de données en accompagnement du déploiement, et bien sûr d'une grande réactivité opérationnelle pour garantir le bon fonctionnement des bus dans la journée. Nous le verrons sur les exemples de l'optimisation du chauffage et le pilotage de la recharge des véhicules.

Piloter le chauffage pour maîtriser l'autonomie

Un changement relativement anodin à première vue concerne le chauffage. Sur un bus thermique, la chaleur pour chauffer le conducteur et les voyageurs provient principalement du moteur thermique, et elle est disponible de manière à peu près illimitée. Dans un bus électrique, le moteur ne génère pas de chaleur réutilisable, du fait d'un rendement bien meilleur. Il faut donc la produire en utilisant l'énergie stockée dans la batterie⁽⁵⁾, et donc l'économiser. Cet enjeu d'économie était nouveau, à la fois pour les constructeurs, les ingénieurs et mainteneurs internes, ou encore les conducteurs.

Les constructeurs et leurs équipementiers n'avaient jamais jusque-là eu besoin de prêter une attention particulière aux performances de chauffage de leurs véhicules, et peu d'attention avait été accordée au sujet. Lors de l'hiver 2018, les premiers bus électriques équipés de chauffages 100 % électriques avaient vu leur autonomie réduite drastiquement, ce qui inquiétait en interne sur la capacité réelle de déployer des autobus électriques.

En effet, comment chauffer au mieux en plein hiver un bus qui est assimilable à un espace de 30 m² dont les portes s'ouvrent toutes les trois à cinq minutes ? Les équipes projet ont montré que c'était possible.

Pour comprendre, des outils de mesure et de vérification ont été déployés par les équipes d'ingénierie. Des analyses ont été menées sur tous les facteurs influençant l'autonomie et le confort thermique à bord des bus, et ont permis deux apprentissages principaux.

Premièrement, les bus électriques appelaient un pilotage très précis du chauffage selon les températures, compétence que toutes les parties prenantes ont dû acquérir. Les logiques de pilotage mises au point permettent maintenant de distinguer le conducteur, assis pendant de longues périodes, des voyageurs, de passage dans le véhicule, venant de l'extérieur.

Deuxièmement, le préconditionnement thermique des véhicules lorsqu'ils rechargent la nuit est indispensable, car il permet non seulement de se servir de l'énergie disponible sur le réseau électrique sans affecter l'autonomie, mais aussi d'améliorer le ressenti du conducteur à sa prise de service. Ce constat pouvait sembler évident, mais le préchauffage des véhicules n'était pas jusqu'alors nécessaire à Paris, et son pilotage a dû être appris par l'ensemble des parties prenantes.

En parallèle, les premiers autobus commençaient à circuler avec des chauffages électriques. La situation étant nouvelle pour les conducteurs et leurs encadrants, des communications régulières ont été réalisées afin de les sensibiliser sur un usage raisonné du chauffage et expliquer ses nouveaux modes de fonctionnement. Les écouter a permis de mieux comprendre leurs besoins, qui avaient certes été anticipés dans les phases en amont, mais la « vraie vie » fait apparaître des besoins plus précis et des situations que personne n'avait anticipées.

(5) Si le bus est équipé d'un chauffage complémentaire, il est possible de produire une partie de la chaleur à partir de carburants embarqués dans le véhicule, ce qui permet notamment de faciliter la gestion des semaines les plus froides de l'hiver.

Ces travaux ont permis de gagner en autonomie l’hiver et de limiter l’influence du chauffage sur l’autonomie. Cet exemple illustre la puissance d’une analyse de données techniques combinée à l’organisation systématique d’un retour d’expérience avec les utilisateurs. Comme c’est souvent le cas dans l’analyse de données, la puissance vient de l’intersection entre traitement de volumes de données importants et recueil méthodique de voix d’experts et d’utilisateurs. Ce fonctionnement nécessite beaucoup d’agilité et un spectre large de compétences, pour porter le changement, tout en écoutant attentivement, et pour identifier les freins réels, tout en changeant de référentiel d’analyse.

La charge électrique des véhicules à grande échelle en pratique

Une des nouveautés majeures liées à l’arrivée de bus électriques est la charge dans les dépôts. La connexion bus-borne est le maillon essentiel de cette charge, et il était bien moins connu que le maillon « bus-pistolet distributeur de diesel ».

Dans les premières expérimentations, chaque constructeur d’autobus avait noué des partenariats avec des fournisseurs de bornes. Parfois, le format des prises était identique entre différents bus, parfois il changeait. Quand il était identique, la compatibilité était possible, mais n’était pas acquise pour autant. Or, il n’était pas acceptable d’avoir des dépôts avec des places attitrées par type de bus, et de devoir démonter, déménager et remonter des bornes quand on déplaçait un bus d’un centre à l’autre.

L’équipe projet a donc choisi d’imposer l’interopérabilité à la fois aux fournisseurs d’autobus et aux fournisseurs de bornes. Par ailleurs, elle a séparé les approvisionnements en lançant des marchés distincts pour les bornes de recharge et pour les bus. L’objectif était que l’ensemble des bornes et des bus électriques soient compatibles entre eux : que n’importe quel bus puisse se charger sur n’importe quelle borne.

Vu les premières expérimentations, les équipes d’ingénierie savaient que l’interopérabilité était le fruit d’un travail patient et méthodique de synchronisation d’acteurs et de nombreux tests. En théorie, l’interopérabilité est définie par la norme ISO-15118. En pratique, les normes laissent toujours des marges d’interprétation, que deux industriels peuvent comprendre différemment, et il arrive aussi que les fabricants ne respectent pas la norme, de manière volontaire ou non. Dans le cas de la charge, il s’agissait pour les industriels des deux côtés de maîtriser les couches de communication entre le bus et la borne. Pour pouvoir faire converger les fabricants de bus et ceux des bornes, les équipes d’ingénierie de la RATP sont elles aussi rapidement devenues expertes

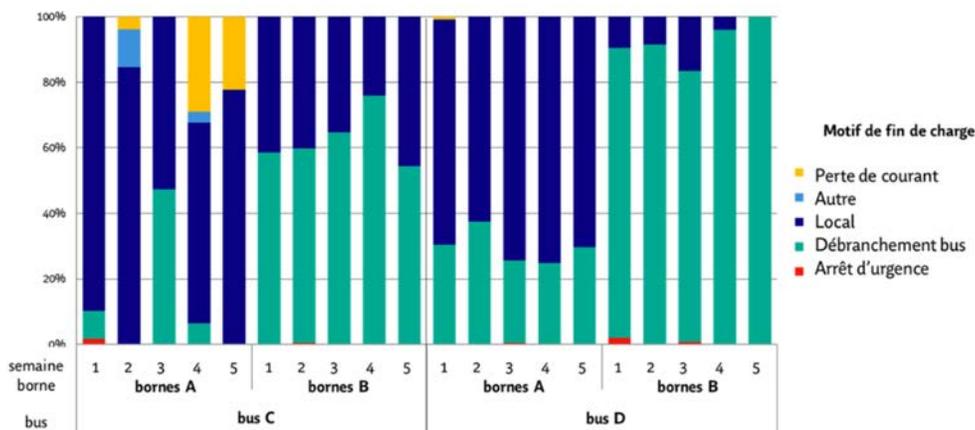


Figure 3. Exemple d’analyse des motifs de fin de transactions de charge par semaine, borne et bus (Source : études RATP)

de ces nouveaux protocoles de communication, afin d'assurer ce rôle d'intégration des différents systèmes.

Pour pouvoir piloter cet apprentissage dans des conditions d'exploitation réelles, des systèmes de supervision ont été mis en place, car il s'agissait à la fois d'améliorer le fonctionnement et de garantir la sortie des bus chargés tous les matins. Des analyses en temps réel et *a posteriori* des données de transactions de charge électrique bus-borne ont ainsi permis de fiabiliser le cœur du système, en comprenant finement les causes de dysfonctionnement majeures pour chaque couple bus-borne comme les défaillances de la batterie, les défaillances de la borne, les défaillances de la communication logicielle bus-borne, l'effet de la mise à jour logiciel sur la fiabilité et la disponibilité de la recharge.

Conclusion

La conversion d'une flotte de bus à l'électrique est une transformation majeure du système de transport, qui nécessite de penser l'évolution de toutes ses composantes. Le programme bus2025 a mis en place une telle transformation à un rythme accéléré. En anticipant les évolutions par des simulations numériques avancées, l'intégration des bus dans l'exploitation et dans le réseau électrique a pu se faire de façon massive, tout en maintenant l'exploitation des centres. Ce déploiement rapide a été rendu possible grâce à un apprentissage organisé, croisant l'analyse de données et les retours de terrain, qui a permis de détecter les potentiels blocages dès les premiers signaux faibles, et de fiabiliser ainsi le système dans les phases en amont du passage à l'échelle massif.

Le programme bus2025 est en train de démontrer que la conversion à l'électrique d'une flotte de plusieurs milliers de véhicules est possible, même sur une technologie en émergence. Une approche systémique, alliant analyse numérique et apprentissage organisé, a été la clé de voûte du succès du programme jusqu'à présent. Le déploiement des bus électriques se poursuit, et nécessitera encore de nombreux efforts collectifs avant d'aboutir d'ici à 2025.

C'est un effort qui le mérite. Au-delà des aspects énergétiques, le bus urbain électrique génère de nombreuses externalités positives au niveau local. Il contribue à rendre nos villes plus silencieuses et plus respirables. Les progrès des traitements numériques ont contribué à rendre ce beau projet possible, et nous espérons qu'il inspirera d'autres grandes améliorations de notre qualité de vie.

Bibliographie

VON PECHMANN F. & MIDLER C. (2019), « Disruption systémique et management de programme ambidextre : le cas des bus électriques », *Gérer & Comprendre*, n°138, décembre, pp. 3-19.