

Etude de pré faisabilité pour un projet pilote de Bus Electriques à Batteries

VERSION 2.0- 06/02/2024

REF : 2654789_T_008_02_SYNTHESE_LIVRABLES

 SYNTHESE DES LIVRABLES



54789 - UE SENEGAL ETUDE PREFAISABILITE BUS

REVISIONS

Révision	Date	Rédacteur	Vérificateur	Approbateur	Modifications
1.0	05/01/24	Pierre Berthon	Frédéric Narduzzi	Frédéric Narduzzi	Création du rapport
2.0	06/02/24	Pierre Berthon	Frédéric Narduzzi	Frédéric Narduzzi	Ajouts de précisions sur les caractéristiques des bus standard européen et 30% moins chers

setec	CETUD
<p>Frédéric Narduzzi Directeur de projet</p> <p>Tél +33 1 82 51 57 68 Mob +33 6 74 79 31 83 frederic.narduzzi@setec.com</p> <p>setec Immeuble Central Seine 42 - 52 Quai de la Rapée - CS 71230 75583 Paris Cedex 12 FRANCE</p> <p>www.setec.com</p>	<p>Khadim CISSE Directeur des Etudes et de la Stratégie Conseil exécutif des Transports urbains durables</p> <p>Tél. +221 33 859 47 20 Mob +221 78 116 08 23 khadim.cisse@cetud.sn</p> <p>CETUD +221 33 859 47 20 +221 33 832 56 86 Route du Front de Terre, BP 17265, Dakar Liberté, 7265, Dakar Sénégal</p> <p>www.cetud.sn</p>

Table des matières

1 — Contexte du projet	3
2 — Synthèse de l'étude	4

1 — Contexte du projet

La région de Dakar au Sénégal regroupe l'essentiel des fonctions administratives, politiques, économiques, et culturelles du pays. Sa population est estimée à 3,9 millions d'habitants en 2021, soit 23 % de la population du pays sur un territoire extrêmement étroit (0,3% du territoire national). Les projections démographiques prévoient 5 millions d'habitants dans la capitale à l'horizon 2030, soit un rythme de croissance deux fois plus élevé que lors des trente dernières années. Si la densité de l'agglomération (près de 5 800 hab./km²) est moyenne, elle cache des disparités importantes entre ses différentes « séquences » urbaines.

Par ailleurs, les contraintes liées à une urbanisation mal maîtrisée ont conduit à de forts déséquilibres territoriaux. D'importants flux domicile-travail s'effectuent ainsi quotidiennement en voiture et en bus entre les secteurs Est et le Centre de Dakar. Le réseau viare atteint ses limites de capacité et les temps de trajet s'allongent et deviennent incertains malgré les efforts notables de création et d'aménagements de voies ou de transports collectifs.

La pression sur les besoins de mobilité urbaine devrait s'accroître avec le développement rapide des secteurs Est de l'agglomération. La congestion automobile, accentuée par le phénomène de goulot d'étranglement dans le secteur de Pikine, mais également la pollution, menacent la viabilité ainsi que l'attractivité économique de l'agglomération dakaroise.

Comme dans beaucoup de capitales africaines, une large partie des services de mobilité est réalisées par des services de micro bus Ndiaga Ndiaye et de Car Rapide ainsi que des taxis formels et informels. Ces services sont assurés par des véhicules qui ont entre 20 et 50 d'âges polluant énormément.

Néanmoins le Sénégal a la particularité d'avoir, sous la gouvernance éclairée du CETUD, réussi depuis plus d'une décennie à intégrer une large part des artisans dans l'AFTU qui reste un modèle inégalé sur le continent. Ce sont plus de 2 500 bus AFTU appartenant à plus de 2 000 propriétaires qui assurent des services respectant des lignes et des arrêts à Dakar et en province et dont les bus *low cost* ont été maintenus et utilisés plus de 10 ans. Les premiers bus ayant été remboursés, ils rachètent aujourd'hui avec leur propre argent des bus Diesel *low cost* correspondant à leur modèle économique existant. Il est donc nécessaire d'accompagner une stratégie de décarbonation des transport publics qui pourrait entraîner le reste des écosystèmes de mobilité et au-delà.

La première phase de la restructuration du réseau de bus « libre » de Dakar initiera la première étape de la transition énergétique grâce à une stratégie GNC (Gaz Naturel Comprimé).

La seconde, sur laquelle porte cette étude de préfaisabilité, permettra d'envisager des déploiements de bus électriques à grande échelle.

L'abondance de l'ensoleillement au Sénégal permet également d'envisager des stratégies d'autoconsommation (« Clean Power to Energy »), qui seront particulièrement pertinentes dans les villes secondaires.

2 — Synthèse de l'étude

Le livrable 1 présente les principales hypothèses et variables d'entrées nécessaires à la réalisation des simulations décrites dans le livrable 2.

Ces simulations visent d'une part à évaluer le besoin énergétique et les limites d'autonomie des bus électriques par ligne via l'outil interne Volt@bus. Le second volet des simulations est une étude des impacts économiques et environnementaux sur une durée de 15 ans des bus GNC (Gaz Naturel Compressé), et électriques via plusieurs scénarios décrits dans ce rapport et exploités via notre outil Verdi. Ces données d'entrées sont issues pour partie des résultats des études réalisées par Ingérop sur le sujet (dont la consommation des bus GNC actualisées avec d'une part le retour d'expérience de setec et d'autre part des informations complémentaires fournies par le CETUD).

Les différents scénarios étudiés sont les suivants pour les bus :

- Bus GNC : Des scénarios avec prise en compte des différentes variantes pour le rafraîchissement de l'habitacle : climatisation, système de VMF (Ventilation Mécanique Forcée) ou aucun système de rafraîchissement de l'habitacle. Ces variantes ont été retenues car elles ont un impact important sur la consommation.
- Bus électriques : Les scénarios étudiés combinent l'impact des équipements de rafraîchissement d'habitacle cités plus haut avec deux variantes de mix électrique (mix fix 2023 ou mix évolutif suivant les perspectives du gouvernement Sénégalais) et le niveau d'approvisionnement en électricité issue du photovoltaïque (100% électricité issue du réseau ou partiellement issue de la production photovoltaïque locale). Une étude de sensibilité permet d'étudier l'impact économique de l'achat de bus électriques aux standards européens et des bus hypothétiquement 30% moins chers, dont les caractéristiques restent à définir (conception extra-européenne, autre technologie de batterie ou rétrofit). Les bus de conception européennes reviendraient, (batterie comprise), à 239,6 millions Fcfa pour les midibus et 308,6 millions Fcfa pour les standards contre 167,7 millions Fcfa pour les midibus et 216 millions Fcfa pour les standards dans le cas de l'hypothèse de bus 30% moins chers.

18 lignes ont été étudiées avec 470 bus au total (dont 307 midibus et 170 standards) projetés à partir de 2031. Le taux de change utilisé dans l'ensemble de l'étude est de 1€ = 666 Fcfa.

Le livrable 2 correspond à la restitution des résultats des simulations décrites dans le livrable 1 (simulation consommation Volt@bus électrique et analyse multicritères économiques et environnementales Verdi).

Le premier des enseignements à tirer de ces simulations de consommation électriques est la faisabilité, au regard des hypothèses d'étude, de déployer une flotte de véhicules électriques sans modification de l'offre de transport projetée (nombre de véhicules, longueur des lignes...). Ce déploiement est rendu possible par l'autonomie des véhicules électriques et sous certaines conditions. En effet, le déploiement n'est réalisable que par la mise en place de véhicules équipés d'une solution de rafraîchissement d'habitacle frugale type VMF (Ventilation Mécanique Forcée). La mise en œuvre d'un dispositif de climatisation dans les bus électrique nécessiterait une modification de l'offre de transport, dont une augmentation significative du nombre de véhicules.

Ces consommations électriques sont par la suite utilisées au niveau de l'outil Verdi.

Les simulations ont ainsi montré que le coût global d'une solution avec des véhicules électriques est systématiquement plus élevé qu'une solution faisant intervenir des véhicules GNC (pour une même offre de transport et pour un même nombre de véhicules). Ce surcoût est essentiellement dû à l'achat des véhicules eux-mêmes, même si les coûts d'exploitation sont plus faibles et plus stables (prix de l'électricité plus faible que le GNC). Comme évoqué précédemment la mise en œuvre d'un dispositif de climatisation conduirait à une augmentation significative du nombre de

bus électriques et donc à un coût global trop important et donc un scénario non viable économiquement.

Pour les scénarios sans hausse du nombre totale de véhicules (le surcoût est compris entre 65% et 70% sur la durée d'étude (TCO compris entre 800 et 850 FCFA/km, soit environ entre 1,2€/km et 1,29€/km). Les coûts totaux sur la durée d'étude s'échelonnent ainsi de 187 à 204 milliards de francs CFA (soit entre 281 millions d'euros à 306 millions d'euros) pour les scénarios GNC et de 312 à 384 milliards de francs CFA pour les scénarios électriques (soit entre 467 millions d'euros à 576 millions d'euros).

Tableau 1 : Coût total (CAPEX +OPEX) par scénario (millions FCFA)

Energie	Système CVAC	Coût (CAPEX +OPEX) en millions FCFA	
GNC	Climatisation	203 687	
	VMF	192 632	
	Pas de CVAC	187 105	
Electrique	Réseau	Climatisation	384 155
		VMF	324 262
		Pas de CVAC	316 840
	Réseau + Photovoltaïque	Climatisation	378 729
		VMF	318 275
		Pas de CVAC	311 858

C'est pour cela qu'un scénario supplémentaire a été étudié avec un coût d'achat réduit des véhicules électriques (-30%) avec un surcoût global qui n'est plus que de 35% environ sur la durée d'étude (TCO entre 650 et 675 FCFA/km, soit environ entre 0,98€/km et 1,01€/km). Les coûts totaux sur la durée d'étude s'échelonnent ainsi de 248 à 305 milliards de francs CFA (soit entre 371 millions d'euros à 450 millions d'euros). Dans ces conditions, le coût de revient de la tonne de CO₂ économisée par les scénarios électriques est compris entre 197 mille francs CFA/tonne équivalent CO₂ et 391 mille francs CFA par tonne équivalent CO₂ (soit entre 295 et 587 euros par tonne équivalent CO₂).

Tableau 2 : Visualisation du gain économique d'une offre de véhicules électriques (batterie comprise) 30% moins chères

Energie	Système CVAC	Coût (CAPEX +OPEX) en millions FCFA			
GNC	Climatisation	203 687	Hypothèse coût d'achat -30%		
	VMF	192 632			
	Pas de CVAC	187 105			
Electrique	Réseau	Climatisation	384 155	305 493	-20%
		VMF	324 262	260 038	-20%
		Pas de CVAC	316 840	252 615	-20%
	Réseau + Photovoltaïque	Climatisation	378 729	300 068	-21%
		VMF	318 275	254 051	-20%
		Pas de CVAC	311 858	247 634	-21%

Opter pour des véhicules électriques comporte néanmoins de nombreux avantages qualitatifs, avec en premier lieu une part des coûts majoritairement due aux CAPEX et non aux OPEX

comme pour les véhicules GNC (ratio CAPEX / OPEX de 70% / 30% pour les scénarios électriques avec véhicules à prix standard et 60% / 30% avec des véhicules électriques moins chères à l'achat, contre 37% / 63% pour le GNC), rendant cette solution plus résiliente aux aléas économiques (notamment le prix de l'énergie), et disposant en plus d'une valeur résiduelle du parc bus en fin de vie plus importante.

Ce surcoût est à mettre en parallèle de gains environnementaux significatifs. En effet, malgré un mix électrique Sénégalais actuellement fortement carboné, les gains vont d'environ 45% à 65% d'émissions équivalent CO₂ sur la durée d'étude en faveur des scénarios électriques (en plus de supprimer les émissions de particules fines issus de la motorisation). Les émissions vont ainsi de 465kt équivalent CO₂ à 575kt équivalent CO₂ pour les scénarios GNC et de 160kt équivalent CO₂ à 314kt équivalent CO₂ pour les scénarios électriques, soit une économie de 261kt à 305kt équivalent CO₂.

Tableau 3 : Emissions de GES (en kt eqCO₂) par scénario

Energie			Système CVAC	Emissions (kt eq CO ₂)
GNC			Climatisation	574 876
			VMF	501 610
			Pas de CVAC	464 977
Electrique	Mix fixe	Réseau	Climatisation	314 381
			VMF	252 971
			Pas de CVAC	219 769
		Réseau + Photovoltaïque	Climatisation	271 446
			VMF	218 841
			Pas de CVAC	191 372
	Mix évolutif	Réseau	Climatisation	253 070
			VMF	204 205
			Pas de CVAC	179 195
		Réseau + Photovoltaïque	Climatisation	221 433
			VMF	179 061
			Pas de CVAC	158 275

L'étude spécifique de l'intérêt de panneaux photovoltaïques en toiture des dépôts a par ailleurs souligné l'intérêt d'une telle solution, tant d'un point de vue environnementale qu'économique (jusqu'à 18% de la consommation électrique des autobus pouvant ainsi être couverte par ces panneaux suivant les hypothèses considérées).

Bien que les avantages de la solution électrique soient à nuancer au vu du surcoût, il est également de considérer que la technologie électrique, contrairement au GNC, peut significativement évoluer sur de nombreux points, comme l'augmentation de l'offre des constructeurs de bus, la baisse des coûts, l'augmentation des performances des véhicules et des batteries, une meilleure résilience sur l'approvisionnement électrique via une production photovoltaïque...

De même, il est à noter que de nombreuses hypothèses considérées pour les simulations peuvent être amenées à évoluer en faveur des scénarios électriques (optimisations sur la structuration du réseau, trajet HLP moins longs, affectation des tournées les plus longues aux véhicules avec le plus d'autonomies...).

Fort de ces résultats, plusieurs pistes d'optimisations économiques et environnementales ont émergé :

- La mise en place d'une recharge partielle des véhicules en ligne, qui permettrait de dimensionner à la baisse la taille des batteries ou de fournir un niveau de confort supplémentaire (utilisation de climatisation) sans devoir pour autant augmenter la taille totale du parc.
- Un renforcement de la production photovoltaïque via par exemple des ombrières équipées sur le remisage, à coupler avec une optimisation du nombre de véhicules rentrant en dépôt en journée afin de limiter la quantité de batteries à installer pour le stockage d'énergie excédentaire.
- D'autres solutions disruptives pourraient également avoir un intérêt, comme le retrofit (baisse du coût d'achat des véhicules), une optimisation au plus juste de la taille de la flotte (avec toujours dans l'objectif de limiter les CAPEX liés à l'achat de véhicules), et dans le cas du scénario GNC, opter pour une solution à bioGNC, (conservation des coûts identiques au GNC mais en améliorant significativement le bilan environnemental).

Le livrable 3, décrit et justifie la mise en place d'une démarche pilote afin d'intégrer au mieux le type de véhicules qui serait pressenti dans le cadre de la restructuration du réseau TC. En effet, il est nécessaire de s'assurer de la bonne adéquation du matériel roulant retenu au regard du contexte local (fiabilité du matériel, comportement des batteries, traitement du refroidissement à l'intérieur du véhicule...) et d'une montée en compétence de acteurs locaux sur ces nouvelles solutions techniques.

La démarche pilote vise au travers de différents projets pilotes coordonnés sous l'égide du CETUD, à valider les solutions technologiques qui sont ressorties des précédents livrables de l'étude de préfaisabilité ainsi que les spécificités opérationnelles. Cette approche expérimentale permet de planifier au mieux la bonne exploitation d'une nouvelle flotte de véhicules à la technologie relativement nouvelle, et d'ajuster le dimensionnement et les caractéristiques de la flotte au plus proche des besoins réels de l'exploitation. Les grands objectifs seront ainsi de recueillir des données réelles sur l'exploitation et les performances des véhicules et des infrastructures afin d'ajuster le modèle issu des résultats des simulations obtenus lors de l'étape précédente, pour planifier au mieux une mise à l'échelle dans le futur, faire monter en compétence les acteurs locaux, tester la robustesse technique de la technologie électrique, optimiser les hypothèses retenues en phase de préfaisabilité, et obtenir des premiers retours sur la maintenabilité, l'exploitabilité et l'acceptabilité auprès des usagers.

Chaque pilote permet ainsi d'étudier la faisabilité et l'impact de configurations techniques et opérationnelles spécifiques. Néanmoins des études de faisabilité spécifiques complémentaires devront être dédiées à leur préparation si le CETUD décide d'aller plus loin dans la réflexion, avec des prescriptions techniques plus détaillées, notamment sur les protocoles d'essais, leurs phasages, en parallèle d'une méthodologie de suivi et d'analyse.

4 démarches pilotes sont ainsi proposées dans ce livrable.

- En étape 1, 2 pilotes pourraient être déployés (2024 - 2026) :
 - Pilote A « Synergie avec le eDépôt BRT »

Ce pilote vise à mutualiser une partie de ces besoins en infrastructure de recharge et de maintenance avec celle du eDépôt du BRT (CAPEX limité sur ce point). Il permettra de mettre en place les différents objectifs de la démarche pilote citée précédemment, en mettant l'accent sur une solution simple (Quick and « Easy » Win). Ce pilote pourra s'appliquer aux lignes des secteurs des futurs dépôts Keur Massar (Phase 1) ou VDN (Phase 2).
 - Pilote B « Plateau »

Ce pilote permettrait plus spécifiquement d'étudier l'intérêt d'une solution de recharge en ligne (accompagné d'une étude de restructuration de l'offre transport pour s'adapter à cette stratégie) au niveau du quartier historique, ainsi que d'une solution frugale de maintenance (maintenance qui pourrait également être réalisée au dépôt existant DDD-CAD). De plus, le terminus de Petersen devrait disposer de chargeurs dédiés au BRT qui ne seront pas utilisés les premières années d'exploitation et qui pourraient donc être exploités dans le cadre de ce pilote.

- En étape 2, 2 pilotes pourraient être déployés (2026 - 2028), ils ont pour objectifs de compléter les données recueillis durant l'étape 1 avec un nombre de bus plus important.
 - Pilote C « Aéroport » :
Recharge et maintenance seraient réalisées au dépôt « Aéroport » de la phase 1 de la restructuration. Certaines lignes pourraient être opérées en 100% électrique, en s'appuyant idéalement sur l'infrastructure de recharge du pilote B qui pourrait être étendue à Colobane. Les contraintes sont la cohabitation de bus électriques et gaz et la reconfiguration du site pour s'adapter aux bus électriques.
 - Pilote D « Keur Massar » :
Recharge et maintenance seraient réalisées au dépôt « Keur Massar » de la phase 1 de la restructuration. Certaines lignes pourraient également couvrir la zone de Diamniadio en bénéficiant du nouveau dépôt dans le cadre de la phase 2 de la restructuration. Comme pour le pilote C, les contraintes sont la cohabitation de bus électriques et gaz et la reconfiguration du site pour s'adapter aux bus électriques.

Plusieurs études qui pourront venir compléter ces pilotes, notamment sur les optimisations potentielles qui sont ressorties du livrable 2 mais aussi des études sur le modèle économique de la chaîne de valeur opérateurs de recharge/ dépôt / voie publique ou la pertinence d'un dépôt multi-énergies multi-services qui pourrait regrouper plusieurs types de véhicules (bus, car, bennes à ordures etc.) pouvant fonctionner grâce à différentes énergies (électricité, GNC + Biogaz des déchets, Hydrogène...).

Les prochaines étapes seront donc de confirmer quelles orientations le CETUD souhaite donner à cette démarche pilote, puis de formaliser son déroulement et son suivi d'un point de vue opérationnel, économique (CAPEX / OPEX), technique et temporel.