

Service de l'urbanisme et de l'environnement

Ville de La Chaux-de-Fonds

■ Etude comparative trolleybus – bus hybrides

RAPPORT TECHNIQUE

Novembre 2013



Nom du fichier	Version	Date	Objet des modifications	Directeur d'étude	Chef de projet	Ingénieur d'étude
0302_130-rap-sfr-1-trolleybus-hybride.docx	1	8.11.13	-	Jean-Marc Dupasquier	Samuel Fréchet	-

Contact :

TRANSITEC Ingénieurs-Conseils SA
 Avenue Auguste-Tissot 4
 CH-1006 LAUSANNE
 T +41 21 652 55 55 F +41 21 652 32 22
 lausanne@transitec.net
www.transitec.net



Table des matières

Page

1. Introduction et buts de l'étude	6
1.1 Contexte de l'étude	6
1.2 Buts de l'étude.....	7
2. Présentation des différents modes de propulsion des transports collectifs urbains sur route	8
2.1 Différents modes de propulsion.....	8
2.2 Description du mode "bus diesel".....	9
2.3 Description du mode "trolleybus".....	10
2.4 Description du mode "bus hybride".....	11
3. Caractéristiques de base du réseau de bus urbain de La Chaux-de-Fonds	14
3.1 Offre actuelle (2013).....	14
3.2 Evolution du parc de bus	16
4. Analyse comparative des impacts des modes de propulsion étudiés.....	17
4.1 Démarche	17
4.2 Impacts par thématique.....	17
4.2.1 Aspects financiers.....	17
4.2.2 Aspects consommation / exploitation	19
4.2.3 Aspects qualité de vie / environnement / institutionnel	22
4.3 Notation des critères étudiés	26
4.4 Evaluation des impacts par thématique	26
4.4.1 Aspects financiers.....	26
4.4.2 Aspects consommation / exploitation	27
4.4.3 Aspects qualité de vie / environnement / institutionnel	28
4.4.4 Synthèse de l'évaluation	29
4.5 Evaluation des impacts par acteur concerné.....	30
4.5.1 Ville de La Chaux-de-Fonds	30
4.5.2 Clients des transports urbains	30
4.5.3 TransN.....	30
5. Synthèse de l'évaluation et recommandations	32
5.1 Synthèse de l'évaluation	32
5.2 Recommandations.....	33

Liste des figures

Page

Figure 1 : Différents modes de propulsion existants et champs de l'étude	8
Figure 2 : Plan du réseau urbain TransN de La Chaux de Fonds (2013).....	15
Figure 3 : Profil en long de la ligne 1 (Arêtes – Gare – Recorne), source TransN	19
Figure 4 : Synthèse de l'évaluation.....	29

Liste des tableaux

Page

Tableau 1 : Comparaison des types de propulsions hybrides	12
Tableau 2 : Caractéristiques du parc de véhicules de TransN de La Chaux-de-Fonds	16
Tableau 3 : Comparaison entre les trois modes de propulsion : coûts liés au véhicule.....	18
Tableau 4 : Comparaison entre les trois modes de propulsion : coûts liés à l'équipement	19
Tableau 5 : Comparaison entre les trois modes de propulsion : aspects énergétiques	20
Tableau 6 : Comparaison entre les trois modes de propulsion : aspects liés à l'exploitation	21
Tableau 7 : Comparaison entre les trois modes : aspects liés au développement du réseau.....	21
Tableau 8 : Bilan énergétique des trois modes de propulsion	22
Tableau 9 : Comparaison entre les trois modes de propulsion : aspects liés à l'environnement.....	22
Tableau 10 : Comparaison entre les trois modes de propulsion : aspects liés à l'intégration urbaine et au bruit	24
Tableau 11 : Comparaison entre les trois modes de propulsion : aspects liés au confort du passager....	24
Tableau 12 : Comparaison entre les trois modes de propulsion : aspects liés au confort de conduite....	25
Tableau 13 : Comparaison entre les trois modes de propulsion : aspects institutionnels	25
Tableau 14 : Evaluation des aspects financiers	26
Tableau 15 : Evaluation des aspects consommation / exploitation.....	27
Tableau 16 : Evaluation des aspects qualité de vie / environnement / institutionnel.....	28

Page

Annexe 1 : Bibliographie	36
Annexe 2 : Description du mode "bus électrique avec charges en ligne"	37
Annexe 3 : Bilan financier comparé des trois modes de propulsions pour une exploitation exclusive avec l'un des modes sur les lignes 1, 2 et 4 du réseau TransN de La Chaux-de-Fonds, sur une période de 20 ans.....	38
Annexe 4 : Simulation des performances des différents modes de propulsion.....	39
Annexe 5 : Tableau d'analyse et d'évaluation	43

1. Introduction et buts de l'étude

1.1 Contexte de l'étude

Depuis octobre 2012, les lignes n° 1, 2 et 4 du réseau TransN à La Chaux-de-Fonds sont partiellement exploitées par des bus hybrides articulés (bus Solaris Urbino 18, d'une capacité de 142 passagers). L'acquisition de ces nouveaux véhicules faisait suite à la décision du Conseil d'administration des TRN prise au printemps 2011 d'abandonner l'exploitation par trolleybus, principalement pour des raisons économiques et environnementales (baisse des coûts d'exploitation et diminution des gaz d'échappement).

Les bus Solaris Urbino récemment acquis par TransN fonctionnent selon une technologie de type hybride parallèle, à savoir :

- deux modes de propulsion disponibles (diesel et électrique – stockage de l'énergie dans des batteries, sans alimentation par des lignes aériennes);
- liaison mécanique des moteurs thermique et électrique aux roues, avec possibilité de circuler dans certaines situations à l'aide du moteur électrique seul ou avec les deux moteurs en parallèle.

Indépendamment de ces aspects, la Ville de La Chaux-de-Fonds a engagé depuis plusieurs années des réflexions concernant le réaménagement de la place de la Gare, pôle d'échange structurant combinant les réseaux de transports collectifs ferroviaires (CFF et CJ) et routier (TransN et CarPostal), les taxis et des zones de dépose-minute et de stationnement (voitures, deux-roues,...). De plus, ce secteur connaît une activité intense avec les différents services et équipements alentour (poste, banques, commerces, cafés-restaurants,...). Dans le cadre du réaménagement de la place de la Gare, le renouvellement des lignes aériennes du réseau urbain TransN a donc été envisagé par l'exploitant et par les services concernés de la Ville de La Chaux-de-Fonds (coût estimé à 2,5 mio de francs pour le remplacement des lignes aériennes dans le secteur de la place de la Gare).

Compte tenu de cette dépense élevée, TransN a proposé au Conseil communal de la Ville de La Chaux-de-Fonds de remplacer les trolleybus par des bus hybrides, permettant ainsi de s'affranchir du renouvellement de ces lignes électriques aériennes et de disposer d'autres gains, notamment urbanistiques dans le secteur de la place de la Gare (suppression des mâts, des câbles porteurs et de la ligne électrique aérienne).

Le Conseil communal est entré en matière quant à l'abandon des trolleybus, **à condition que les nouveaux véhicules hybrides présentent des avantages comparables du point de vue environnemental** (bruit et pollution de l'air).

Avant d'entériner cette décision, le Conseil général de La Chaux-de-Fonds a souhaité qu'une étude complète soit menée pour démontrer le bien-fondé de ce choix par rapport au bilan écologique entre le trolleybus et le bus hybride.

Ainsi pour la réalisation de cette étude, la Ville de La Chaux-de-Fonds a mandaté le 7 février 2012, le bureau Transitec Ingénieurs-Conseils SA, à Lausanne, en groupement avec la Haute école spécialisée de Bienne pour ce qui concerne les aspects liés à la motorisation, à la consommation et à la pollution.

1.2 Buts de l'étude

Les buts de la présente étude sont donc les suivants :

- **présenter succinctement les modes d'exploitation "trolleybus", "bus hybride" et "bus diesel", en particulier au niveau de leurs caractéristiques de base et de leurs principaux avantages et inconvénients;**
- **analyser et évaluer les impacts de ces deux modes d'exploitation en intégrant le contexte rencontré à La Chaux-de-Fonds, avec la dissociation des impacts par thématique** (aspects environnementaux et énergétiques, principes d'exploitation, coûts économiques, cadre et qualité de vie, perception par les usagers, impacts sociaux et développement durable) **et par acteur concerné** (Ville de La Chaux-de-Fonds, clients et TransN);
- **établir un bilan comparatif entre les deux modes d'exploitation, avec recommandation sur la base des impacts pondérés pris en considération.**

Remarque : dans le cadre de la présente étude, il n'est pas prévu de considérer d'autres modes de propulsion tels que l'hydrogène (pile à combustible) ou le gaz naturel (CNG).

2. Présentation des différents modes de propulsion des transports collectifs urbains sur route

2.1 Différents modes de propulsion

Les modes de propulsion des véhicules routiers de transports publics sont en pleine évolution avec l'arrivée de nouvelles technologies qui s'additionnent aux technologies éprouvées. Trois catégories de propulsion peuvent être mentionnées :

- la propulsion à moteur thermique avec les bus "diesel";
- la propulsion à moteur électrique, avec les trolleybus (captage aérien continu de l'énergie) et les bus électriques (avec batterie rechargeable au dépôt, aux terminus ou aux stations);
- les autres types de propulsion, comme par exemple les bus à hydrogène (pile à combustible) ou au gaz naturel. Les principaux inconvénients de ces autres types de propulsion restent le coût total (par rapport au diesel) et le faible déploiement de ces technologies sur le marché.

A ces différents types de propulsion s'ajoute la propulsion hybride qui intègre un moteur thermique et un moteur électrique dans le véhicule.

Les différents constructeurs présents sur le marché de l'autobus proposent ces différentes propulsions de manière plus ou moins avancée. Les spécificités et l'histoire des réseaux de bus urbains sont à l'origine de l'utilisation plus ou moins poussée de ces différents modes de propulsion.

Les paragraphes suivants décrivent succinctement les modes "diesel", "trolleybus" et "bus hybride" avant d'entrer dans les caractéristiques fines de ces modes pour la ville de La Chaux-de-Fonds dans le chapitre suivant.

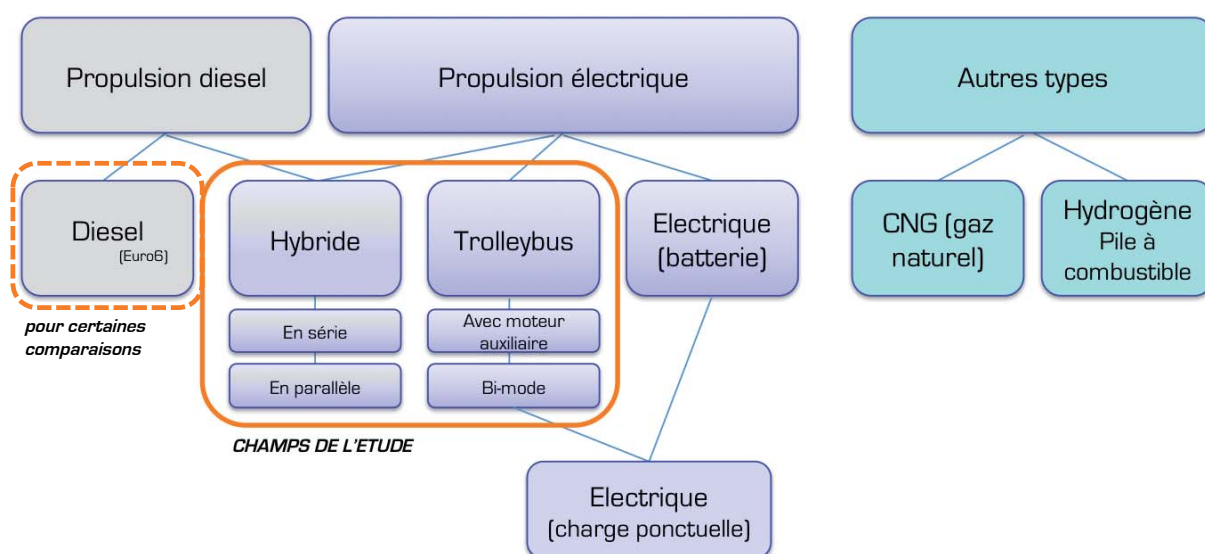


Figure 1 : Différents modes de propulsion existants et champs de l'étude

2.2 Description du mode "bus diesel"

Le bus diesel est le plus répandu sur les réseaux de transports publics, grâce à la facilité d'acquisition du matériel roulant (prix attractifs en raison des grandes séries de production) et du diesel. Son principal inconvénient est justement lié à l'énergie et aux rejets de polluants dans l'air.

Cependant, l'introduction de la norme Euro 6 permet de réduire encore plus drastiquement les pollutions de particules fines, d'oxyde d'azote, d'hydrocarbure et de monoxyde de carbone. Les premiers bus Euro 6 sont sur le marché depuis 2013. L'économie d'énergie atteint 10 à 20% par rapport aux bus Euro 5.

Ce type de véhicule est particulièrement performant dans les conditions hivernales rencontrées à La Chaux-de-Fonds, grâce aux deux essieux moteurs des bus articulés.

Le coût d'un véhicule diesel est de l'ordre de 500'000.- pour un bus articulé.

Le poids à vide d'un diesel articulé (Solaris Urbino 18) est de 17 tonnes et de 28 tonnes pour le poids total (170 places).



Bus MB Citaro, La Chaux-de-Fonds, 2013

2.3 Description du mode "trolleybus"

Le premier trolleybus a circulé en 1882 dans la région de Berlin. Il est fabriqué par la société Siemens. Son apparence le situe entre l'autobus (pas de guidage au sol) et le tramway (alimentation électrique). Si son développement a été difficile à ses débuts, il s'est rapidement étendu dans les villes européennes dès la fin de la Première Guerre mondiale. Son essor en Suisse est lié au démantèlement des tramways dans les années 1950-1960 qu'il remplace dans les grandes villes romandes.

Le trolleybus capte son énergie électrique dans le système bifilaire qui constitue la ligne aérienne de contact, située à 5,5 mètres du sol hors site propre et à 5,0 mètres en site propre (selon les dispositions d'exécution de l'OIEC¹). La capacité de débord du trolleybus est d'environ 4 mètres, ce qui lui permet de contourner un obstacle sans dépercher.

Pour les circulations hors ligne aérienne de contact (lors de travaux, manifestation,...), **un moteur d'appoint peut être intégré au véhicule et permettre une autonomie plus ou moins importante**. Dans le cas du trolleybus bi-mode, deux chaînes de traction indépendantes, l'une avec un moteur diesel et l'autre avec le moteur électrique, permettent au conducteur de choisir son mode de propulsion. Ce fonctionnement permet au bus de circuler sur des tronçons non équipés, comme par exemple pour rejoindre le dépôt ou dans le cas d'extension de ligne. Sinon, le trolleybus est équipé d'un moteur auxiliaire (génératrice) permettant de donner une faible autonomie au véhicule, sur une courte distance (par exemple, franchissement d'un carrefour en cas de déperchage). Enfin, les dernières évolutions du marché du trolleybus visent à le rendre plus autonome par des super-condensateurs récupérateurs d'énergie (par exemple, lors des manœuvres de freinage), ne nécessitant plus l'utilisation d'un moteur d'appoint.



Trolleybus NAW/Hess, La Chaux-de-Fonds, 2013

Le trolleybus n'émet pas de gaz nocifs en raison de son mode de propulsion. La **récupération d'énergie** lors des freinages ou dans les pentes est réinjectée dans le réseau. Il est silencieux, notamment dans les pentes en montée. Par contre, la ligne aérienne de contact peut être perçue comme un obstacle visuel ou une contrainte de fonctionnement.

En hiver, l'exploitation du trolleybus nécessite le dégivrage de la ligne de contact effectué par un véhicule spécifique. Sur neige, moyennant une motorisation adéquate, le trolleybus se déplace sans problème.

¹ Ordonnance sur les installations électriques des chemins de fer

La **technologie du trolleybus est donc fiable**, éprouvée dans de nombreux contextes topographiques et climatiques. D'autre part, la longévité des véhicules est généralement admise à 20 à 30 ans alors que la durée de vie de la ligne de contact est de l'ordre de 40 ans.

En Suisse, la circulation des trolleybus est régie par la Loi fédérale sur les entreprises de trolleybus.

Le coût d'achat du trolleybus articulé est légèrement supérieur à 1 millions de francs.

Le poids à vide d'un trolleybus articulé (NAW/Hess) est de 18 tonnes et de 28 tonnes pour le poids total (150 places).

2.4 Description du mode "bus hybride"

La **technologie hybride a pour but de combiner efficacement les avantages de la propulsion thermique, à savoir l'absence de guidage, et de la propulsion électrique**, soit les caractéristiques intrinsèques du moteur électrique (pas de rejet d'émissions de polluants et nuisances sonores limitées). Les premiers véhicules hybrides sont en circulation depuis le début des années 1990. La principale difficulté de ce type de véhicule réside dans la capacité de stockage de l'énergie électrique dans les batteries. Seuls des bus de petite capacité (maximum 40 personnes) peuvent avoir une autonomie suffisante pour des circulations en ville en utilisant uniquement la batterie.

Le véhicule hybride possède deux moteurs : un moteur électrique et un moteur diesel. Cette technologie permet d'économiser environ 20% à 30 % de carburant par rapport à un bus diesel standard. Le rendement énergétique des véhicules à moteur électrique est d'environ 90%, contre 40% pour les véhicules diesel. Le poids à vide d'un bus hybride articulé (Solaris Urbino 18) est de 18 tonnes et de 28 tonnes pour le poids total. Ce véhicule coûte environ 700'000.- à l'achat.

Deux systèmes hybrides existent :

- **hybride de série** : le moteur électrique est connecté aux roues du véhicule et le moteur thermique est branché à une génératrice qui transforme l'énergie en électricité, avant d'arriver sur le moteur électrique. Le bus hybride en série permet une réduction plus grande de la consommation de diesel : la récupération est en effet plus efficace si elle est donnée par une chaîne de traction purement électrique;
- **hybride en parallèle** : les deux moteurs électrique et thermique sont connectés à une unité motrice qui propulse le véhicule. De plus, le moteur thermique est également relié à une génératrice produisant de l'électricité (pour l'alimentation de la batterie ou du moteur électrique). Les bus hybrides avec un accumulateur SuperCap sans batterie en parallèle récupèrent plus ou moins d'énergie de freinage avant un arrêt. Cette solution est toutefois peu adaptée sur un parcours avec des montées. Il faut une batterie d'une grandeur adaptée pour pouvoir récupérer l'énergie à la descente. Cette technologie est appliquée sur les bus hybrides de TransN à La Chaux-de-Fonds.

La récupération d'énergie se fait au travers de la génératrice et se stocke dans la batterie électrique.

Le bus articulé est plus performant avec deux essieux moteurs pour une circulation en condition hivernale. Les véhicules hybrides n'ont pas encore développé cette motorisation, ce qui pèjore légèrement les performances de ce mode de propulsion.



Bus hybride Solaris Urbino 18, La Chaux-de-Fonds, 2013

	Hybride en série		Hybride parallèle	
	<i>donnée</i>	<i>remarque</i>	<i>donnée</i>	<i>remarque</i>
accélération au démarrage	1 m/s ²	purement électrique	1 m/s ²	purement électrique
accélération en ligne	1 m/s ²	purement électrique	mixte	puissance élevée diesel actif
puissance diesel	50%	par rapport à un véhicule diesel	50%	par rapport à un véhicule diesel
puissance électrique	100%	puissance maximale produite	50%	puissance réduite
couple diesel	50%	par rapport à un véhicule diesel	50%	par rapport à un véhicule diesel
couple moteur électrique	100%	entraîne et récupère	50%	entraîne et récupère
récupération	100%	puissance maximale récupérée	50%	puissance réduite et réduction du rendement
utilisation de la batterie	100%	peut gérer la puissance maximale	50%	puissance réduite
capacité de la batterie utilisée	> 10kWh	charger avec puissance élevée	1 à 10 kWh	moteur diesel très souvent ou toujours en action
durée de vie de la batterie	> 6 ans	env. 100'000 cycles, DOD 15%, correspond à 1'000kg de batterie	> 6 ans	
émission sonore		en propulsion purement électrique, similaire au trolleybus (69 dB à 7,5m)		comme le bus diesel avec un bruit réduit en phase de démarrage à la descente
charge de la batterie avec du carburant diesel		but: minimiser les émissions sonores dans les zones sensibles au bruit (charge de 10 minutes pour 40 minutes de circulation)		moteur diesel requis dans les montées

Tableau 1 : Comparaison des types de propulsions hybrides

Des incertitudes subsistent encore :

3. Caractéristiques de base du réseau de bus urbain de La Chaux-de-Fonds

3.1 Offre actuelle (2013)

Le réseau urbain de TransN comprend quatre lignes diamétrales exploitées du lundi au samedi de 6h00 à 19h00 ainsi que le dimanche de 14h00 à 18h00. Elles sont cadencées à 10 minutes (20 minutes le samedi en bordure d'horaire ainsi que le dimanche) :

- ligne n° 1 : Arêtes – Gare – Recorne : 3,9 km;
- ligne n° 2 : Charrière – Gare – Combe-à-l'Ours : 5,1 km;
- ligne n° 3 : Foulets – Gare – Patinoire;
- ligne n° 4 : Hôpital – Gare – Breguet / Eplatures : 4,7 km.

Les lignes 1, 2 et 4 sont équipées de ligne aérienne de contact pour être exploitées par trolleybus, sur un total de 11,3 km² (+ 0,2 km en direction du dépôt de l'Allée des Défricheurs) de voiries équipées (linéaire total de 23 km).

Le soir, jusqu'à 23h30, et le dimanche de 7h00 à 14h00, certaines lignes sont regroupées pour former des boucles :

- ligne n° 1 : Arêtes – Gare – Recorne;
- ligne n° 52 : Gare – Hôpital – Charrière – Gare;
- ligne n° 53 : Gare – Patinoire – Foulets – Gare;
- ligne n° 54 : Gare – Eplatures – Breguet – Gare.

Quatre lignes sont exploitées avec une cadence de 20 minutes. La desserte s'effectue à la demande sur réservation le soir et le dimanche :

- ligne n° 5 : Gare – Tourbillon;
- ligne n° 10 : Gare – Sombaille – Plaisance – Gare;
- ligne n° 11 : Gare – Cerisier;
- ligne n° 12 : Gare – Joux-Perret.

La couverture du territoire est très bonne puisqu'à l'exception de Plaisance, de la Sombaille, du Couvent et de Sur la Cluse, tous les secteurs urbanisés se trouvent à moins de 300 m d'une ligne desservie à 10 minutes de cadence.

² Les troncs communs sont comptabilisés une seule fois.

Le réseau formé de lignes diamétrales permet de faciliter les correspondances à la gare. Il péjore néanmoins sensiblement les relations tangentielles (par exemple, Recorne – Eplatures ou Arêtes – Hôpital).



Figure 2 : Plan du réseau urbain TransN de La Chaux de Fonds (2013)

Les quatre lignes principales fonctionnent selon **quatre principes facilement compréhensibles pour l'utilisateur**, mais exigeant une ponctualité accrue pour l'exploitant :

- 10 minutes de cadence;
- 10 minutes de parcours entre la gare et les terminus;
- départ de la gare et des terminus aux minutes 00/10/20/30/40/50 pour les lignes 2 et 3, aux minutes 05/15/25/35/45/55 pour les lignes 1 et 4;
- le soir, départ simultané de toutes les lignes depuis la gare aux minutes 00/20/40 (départ des terminus aux minutes 10/30/50).

3.2 Evolution du parc de bus

Depuis l'abandon du tramway en 1950, le parc de véhicule du réseau de La Chaux-de-Fonds est composé de trolleybus et d'autobus mini, midi (10,5 mètres), standards (12 mètres) ou articulés (18 mètres). En 2011, son total s'élève à 32 véhicules, présentés dans le tableau ci-dessous.

En 2012, TransN a acquis **sept autobus articulés hybrides** en vue de remplacer le parc de trolleybus. Plusieurs paramètres ont mené à ce choix :

- les nombreuses manifestations et les travaux provoquent régulièrement des **modifications de tracé** ne pouvant être réalisées avec les trolleybus et nécessitant un parc de véhicules complémentaire;
- le **réaménagement complet de la place de la Gare** nécessite le déplacement des lignes de contact pour un coût de 2,5 millions de francs;
- des **problèmes techniques** sont apparus dans les châssis de certains trolleybus;
- l'utilisation de trolleybus en **petite série** (12 véhicules à La Chaux-de-Fonds, 44 au total pour TransN avec le réseau de la Ville de Neuchâtel) engendre des coûts supplémentaires à l'achat et à l'entretien.

Type	Marque	Longueur du véhicule [m]	Mise en service	Nombre de places assises	Nombre de places totales	Parc 2011	Parc 2013	Age moyen 2011	Age moyen 2013
Trolleybus						12	6	9.8	12.5
Tb articulé	NAW/Hess	18	1996	47	151	5	3	15	17
Trolleybus	Solaris Trollino 12	12	2005	36	85	3	3	6	8
Tb articulé	Solaris Trollino 18	18	2005	50	128	4	0	6	8
Autobus						20	20	3.7	5.7
Autobus	MB Citaro	12	2010	32	89	8	8	1	3
Ab articulé	MB Citaro	18	2002	52	168	4	4	9	11
Midibus	Volvo	10.5	2009	31	66	3	3	2	4
Midibus	MB Citaro	10.5	2010	27	85	2	2	1	3
Minibus	Mercedes	7	2004	14	23	3	3	7	9
Hybride						0	7	0	1
Hybride articulé	Solaris Urbino 18	18	2012	43	143	0	7	0	1
Total						32	33	5.9	5.9

Tableau 2 : Caractéristiques du parc de véhicules de TransN de La Chaux-de-Fonds

L'âge moyen du parc est resté stable entre 2011 et 2013 avec 5,9 ans, grâce au renouvellement d'une partie des véhicules. L'âge moyen du parc trolleybus passe pour sa part d'environ 10 ans à 12,5 ans et celui du parc autobus de 3,7 à 4,4 ans, avec l'arrivée des hybrides.

En 2010, la production kilométrique du réseau urbain s'élevait à environ 1'500'000 km, dont 31% effectuée par les trolleybus.

En 2014, le parc de véhicules sera composé de 29 véhicules (soit 4 bus de moins qu'en 2012) en raison de l'optimisation de l'utilisation des véhicules. Les véhicules seront hybrides (11 unités articulées) et thermiques (18 unités de différentes longueurs).

4. Analyse comparative des impacts des modes de propulsion étudiés

4.1 Démarche

L'analyse et la comparaison des trois modes de propulsion étudiés se base sur les données reçues de TransN, les données récoltées dans la littérature (études existantes, revues spécialisées) et de calculs effectués sur la base de ces informations.

Les impacts sont étudiés par thématique (les aspects financiers, les aspects liés à la consommation et à l'exploitation et les aspects liés à la qualité de vie, l'environnement et institutionnels), puis par acteur concerné (Ville de La Chaux-de-Fonds, usagers, exploitant TransN). La comparaison entre les différents modes de propulsion par critère thématique ou par acteur permet d'avoir une vision transversale de leurs impacts.

Enfin, une note est donnée pour chaque critère pour permettre une évaluation et arriver sur la recommandation d'un mode de propulsion à favoriser sur le réseau de La Chaux-de-Fonds.

4.2 Impacts par thématique

4.2.1 Aspects financiers

Les aspects financiers étudiés sont d'une part liés au véhicule et à ses caractéristiques et, d'autre part, en relation avec l'équipement nécessaire à mettre en place pour assurer le fonctionnement des véhicules. Enfin, un bilan financier est présenté sur 20 ans en annexe 3 (durée de vie admise pour un trolleybus).

Coûts liés au véhicule

A l'achat, le trolleybus est deux fois plus cher que le bus diesel (1'160'000.- contre 520'000.-) en raison notamment des faibles séries fabriquées sur le marché et d'un équipement électrique plus coûteux. Le bus hybride offre en effet une structure commune avec le bus diesel, permettant la réalisation de grandes séries. Par contre, la durée de vie du bus hybride est moindre (10 ans environ). Il est important de relever que la durée de vie "technique" peut être différente de la durée de vie "effective" ou "ressentie par le client". En effet, les fortes évolutions technologiques rendent rapidement des véhicules "démodés". Ainsi, certains réseaux maintiennent un parc de bus diesel à 5 ans d'ancienneté.

Le coût de l'énergie est plus faible pour le trolleybus (électricité) que pour le bus diesel (gazole), lorsque celui est rapporté au kilomètre parcouru. A l'inverse, les coûts de maintenance sont sensiblement plus élevés pour le trolleybus.

L'amortissement d'un trolleybus est de 7% par année chez TransN, ce qui revient à un amortissement complet sur environ 15 ans.

Ann. 3 Le bilan financier des coûts liés aux véhicules est établi sur 20 ans, correspondant à la durée de vie du trolleybus qu'il serait prévu d'acquérir dès 2014 dans le cadre d'un fonctionnement unique avec ce type de véhicule. Cette durée correspond à l'acquisition de deux séries de véhicules pour les modes "hybrides" et "diesel". La comparaison porte sur un parc de 17 véhicules fonctionnant avec la même mode de propulsion pour les lignes 1, 2 et 4 à partir de 2014 jusqu'en 2034. Sur la base des données à disposition, ce bilan financier intègre les coûts d'investissement, les coûts d'exploitation et l'amortissement. Les remarques suivantes peuvent être faites :

- sur la base du parc actuel et pendant une période de 20 ans, les coûts d'investissements pour les différents modes de propulsion sont de :
 - pour le trolleybus : 25 mio CHF (soit 1,3 mio CHF/an), incluant le matériel roulant, la ligne de contact et les travaux sur la place de la Gare;
 - pour le bus hybride : 21 mio CHF (soit 1 mio CHF/an), incluant le matériel roulant et la suppression de la ligne de contact;
 - pour le bus diesel : 15 mio CHF (soit 0,7 mio CHF/an), incluant le matériel roulant et la suppression de la ligne de contact;
- sur 20 ans, les coûts totaux annuels (incluant l'investissement, l'exploitation et l'amortissement) pour le "tout trolleybus" sont de 1,4 mio CHF/an contre 1 million CHF/an pour le bus hybride et 900'000 CHF/an pour le bus diesel. Durant cette période, les trolleybus n'ont pas été changés alors que les bus hybrides et diesel ont été renouvelés une fois;
- le non-remplacement ou la suppression des bus hybrides nécessite l'acquisition de 14 trolleybus à court terme (1 à 2 ans). Dans les variantes "tout hybride" et "tout diesel", les trolleybus circulant en 2013 sont remisés. Enfin pour le "tout diesel", les bus hybrides ne sont pas remplacés.

Le tableau ci-dessous récapitule les données concernant les coûts pour les trois types de véhicules.

	TROLLEYBUS	BUS HYBRIDE	BUS DIESEL
Critère	donnée	donnée	donnée
coût d'acquisition	sFr. 1'160'000	sFr. 710'000	sFr. 520'000
coût de l'énergie	0.60 CHF/km	0.62 CHF/km	0.68 CHF/km
coûts d'entretien et de maintenance	1.03 CHF/km	0.68 CHF/km	0.60 CHF/km
amortissement	7%	8%	9%
durée d'utilisation du véhicule	16-22 ans	10-12 ans, durée de vie de la batterie d'environ 6 ans	10-13 ans
plan d'investissement (véhicule + équipement, sans dépôt)	élevé	moyen	faible

Tableau 3 : Comparaison entre les trois modes de propulsion : coûts liés au véhicule

Coûts liés à l'équipement

Ces coûts concernent uniquement le trolleybus. En effet, la chaussée sur laquelle circulent tous les bus est un élément nécessaire pour les trois modes; la station service ou les éléments chargeurs de batterie sont déjà existants dans le dépôt TransN de l'Allée des Défricheurs.

Parmi ces coûts, il s'agit de tout ce qui concerne la ligne aérienne de contact, que ce soit la pose pour une extension de réseau, l'amortissement de l'équipement existant, la rénovation, l'entretien, la maintenance de la ligne ou encore le démontage des lignes existantes dans les variantes "hybride" ou

"diesel". Ce démontage n'est pas indispensable mais permet d'entériner le choix de supprimer le trolleybus.

Le tableau ci-dessous récapitule les données concernant les coûts pour les trois types de véhicules.

	TROLLEYBUS	BUS HYBRIDE	BUS DIESEL
Critère	donnée	donnée	donnée
coût de la pose de la ligne de contact	350'000 CHF/km	-	-
amortissement de la ligne de contact	5%	-	-
coût de la rénovation de la ligne de contact	sFr. 2'500'000	-	-
coût du démontage de la ligne de contact sur l'ensemble du réseau de La Chaux-de-Fonds	pas nécessaire	sFr. 600'000	sFr. 600'000
coûts d'entretien et de maintenance (ligne de contact)	0.88 CHF/km	-	-

Tableau 4 : Comparaison entre les trois modes de propulsion : coûts liés à l'équipement

4.2.2 Aspects consommation / exploitation

Aspects énergétiques

La Ville de La-Chaux-de-Fonds est située à flanc de montagne, avec des pentes importantes. L'altitude du centre-ville est environ 1'000 mètres et la ligne 1 monte au-delà de 1'100 mètres (Recorne).

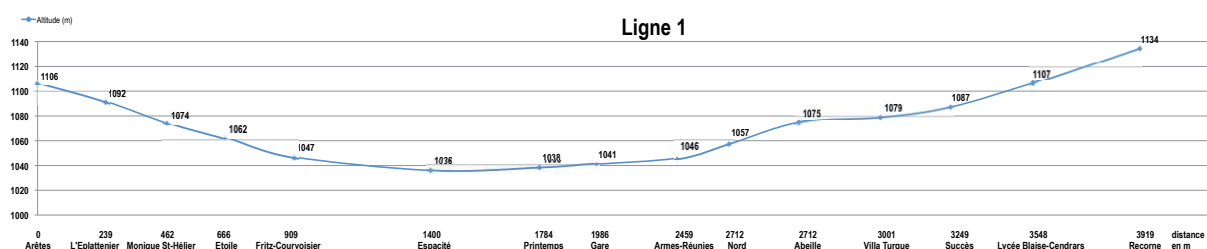


Figure 3 : Profil en long de la ligne 1 (Arêtes – Gare – Recorne), source TransN

Au regard de cette topographie particulière, la consommation énergétique pour les différents modes de propulsion a été évaluée. Si la consommation est légèrement plus faible pour le bus hybride que pour le bus diesel, elle est deux fois plus faible pour le trolleybus par rapport au bus diesel. Il est cependant à noter que des variations existent entre l'été et l'hiver (chauffage ou climatisation), mais sans différence significative entre les modes.

Ann. 4 L'efficacité énergétique du trolleybus est de 80% environ (sans prise en compte de la récupération d'énergie réinjectée dans la ligne aérienne) contre 45% pour le bus hybride (avec récupération d'énergie pour recharger la batterie) et 30% environ pour le diesel (sur la base de la consommation énergétique). Les simulations sont présentées en annexe 4.

La récupération d'énergie est donc possible pour les modes électriques dans les pentes descendantes et lors du freinage. Le trolleybus offre la possibilité de réinjecter le courant électrique dans la ligne aérienne et donc dans le réseau pour les autres véhicules. A La Chaux-de-Fonds, il ne circule cependant pas suffisamment de véhicules pour procéder de la sorte et cette récupération n'est pas effective. Le bus hybride fait de la récupération locale en rechargeant la batterie. A La Chaux-de-Fonds, la topographie des

lignes 1 et 4 offre la possibilité de recharger la batterie lors de la descente et d'utiliser ce gain lors de la montée qui suit.

En Suisse, la disponibilité de l'électricité est élevée avec la présence de l'énergie hydraulique principalement, ce qui permet une stabilité du prix du courant qui n'est pas soumise à une importation trop forte. Par contre, les autres modes de propulsion sont fortement dépendants du pétrole, des fluctuations des prix du marché ou encore de la disponibilité à long terme.

La maturité de la technologie trolleybus est avérée, malgré un nombre plus faible de constructeurs que pour les bus diesel. Le matériel robuste est connu par les techniciens du réseau TransN sur toute la durée de vie du matériel. A l'inverse, la technologie hybride est relativement récente, même si pratiquement tous les constructeurs de bus classiques proposent ce mode dans leurs catalogues. A titre d'information, le constructeur Volvo a arrêté la production de véhicules diesel pour se consacrer à l'hybride en raison des performances de ce mode. Ainsi, le comportement des bus hybrides sur le long terme doit encore être apprécié, notamment par rapport à la durée de vie de la batterie (6 ans environ) et aux perspectives de revente des véhicules au terme de leur vie en Suisse.

	TROLLEYBUS	BUS HYBRIDE	BUS DIESEL
Critère	donnée	donnée	donnée
consommation	2.4 - 3.2 kWh/km (équivalent 30 l/100 km)	45-60 l/km	60-70 l/100km
efficacité énergétique	env. 80%	env. 45%	env. 30%
dépendance par rapport à l'augmentation du prix de la matière première	très faible	faible	forte
disponibilité de l'énergie	élevée	élevée	moyenne à long terme
maturité de la technologie	très bonne	moyenne	très bonne
recupération d'énergie (freinage)	moyenne	très bonne	pas possible

Tableau 5 : Comparaison entre les trois modes de propulsion : aspects énergétiques

Aspects liés à l'exploitation

L'exploitation des transports publics à La Chaux-de-Fonds est fortement impactée par les conditions topographiques et météorologiques. Les véhicules électriques sont particulièrement bien adaptés pour franchir les pentes, notamment le trolleybus avec un couple très important. Le risque du bus hybride est le déchargement de la batterie dans les pentes trop importantes, ce qui n'est pas le cas à La Chaux-de-Fonds. Par contre, les hybrides actuels de TransN possèdent uniquement un essieu moteur qui peut s'avérer problématique pour certains démarrages en côte en période hivernale (chaussée verglacée). Ce problème peut être résolu avec deux essieux moteurs.

Les conditions météorologiques extrêmes en hiver pénalisent l'exploitation des trolleybus. Les longues périodes de gel nécessitent le dégivrage de la ligne de contact à l'aide d'un véhicule spécial. Certaines années, cette opération est effectuée jusqu'au mois d'avril (soit environ 6 mois de l'année).

La solution "trolleybus" est peu adaptée pour les modifications d'itinéraires en raison de la nécessité de la présence de la ligne de contact pour assurer la propulsion des véhicules. En effet, les trolleybus de TransN ne possèdent pas de moteurs thermiques d'appoint permettant de parcourir quelques centaines

de mètres lors de dérangement sur le parcours usuel (exemple : travaux, manifestations,...). Cette situation oblige l'exploitant à engager des véhicules diesel de remplacement, dont il souhaiterait se passer.

Le parc de véhicules est très jeune pour les bus hybrides (1 an) et atteint la "mi-vie" pour les bus diesel (5,7 ans) et les trolleybus (12,5 ans).

	TROLLEYBUS	BUS HYBRIDE	BUS DIESEL
Critère	donnée	donnée	donnée
impact climatique (neige, givre,...)	fort	moyen, avec les véhicules acquis (un essieu moteur)	faible
impact topographique	bien adapté	adapté	bien adapté
flexibilité - adaptativité du réseau pour événement ponctuel	très faible sans modification de l'infrastructure	bonne	bonne
ancienneté du parc	12,5 ans	1 an	5,7 ans

Tableau 6 : Comparaison entre les trois modes de propulsion : aspects liés à l'exploitation

Aspects liés au développement du réseau

Le développement du réseau passe par l'augmentation du nombre de véhicules dont l'acquisition ne pose pas de problèmes pour le trolleybus ou le bus diesel en raison de la présence de nombreux constructeurs sur le marché. Pour le bus hybride, même si de nombreux constructeurs proposent ce mode, tous les modèles ne sont encore fiables et forcément adaptés à La Chaux-de-Fonds (motorisation par exemple).

L'extension du réseau nécessite la pose de ligne aérienne de contact pour le trolleybus, à moins que les véhicules ne soient bi-modes comme à Fribourg (forte autonomie grâce à un moteur thermique d'appoint), mais les véhicules sont à la fois plus lourds et plus chers à l'acquisition. D'autre part, il est nécessaire de demander une concession à l'Office fédéral des transports (OFT) pour obtenir l'extension et l'exploitation d'une ligne de trolleybus, car ceux-ci sont assimilés au transport guidé.

	TROLLEYBUS	BUS HYBRIDE	BUS DIESEL
Critère	donnée	donnée	donnée
concurrence des constructeurs	forte	moyenne	forte
infrastructure, extension de ligne	contraignante	aucune	aucune
demande de concession	nécessaire	aucune	aucune

Tableau 7 : Comparaison entre les trois modes : aspects liés au développement du réseau

4.2.3 Aspects qualité de vie / environnement / institutionnel

Environnement

En tant que véhicule, le trolleybus n'émet pas de polluants. Les émissions de CO₂ sont quasi nulles dans le cas d'une énergie suisse en raison de sa provenance (essentiellement hydraulique). En prenant en considération, un mix européen (intégrant les centrales à charbon allemandes par exemple), les valeurs sont de 0,38 kg/km (TTW, "tank to wheel" : en prenant en considération le circuit du réservoir du bus à la roue) et de 0,48 kg/km (WTT, "weel to tank" : du puit au réservoir du bus). Ces valeurs sont plus faibles que pour le moteur thermique. Le bus hybride et le bus diesel respectent les normes Euro qui imposent des valeurs limites pour les polluants NO_x, PM, CO₂.

En termes d'énergie grise absolue, les trois types de véhicule ne diffèrent pas fortement. Comme la durée de vie est différente, le trolleybus est optimal par rapport à ce critère. Il faut constater que l'énergie grise représente de 7 à 10% de la consommation d'énergie totale. Le recyclage ne pose pas de problèmes pour les trois types de véhicules. Les batteries modernes (Li-Ion) utilisées dans le bus hybride ne contiennent pas de matériaux critiques et le cycle de vie de la production au recyclage est bien défini et contrôlé.

		TROLLEYBUS	BUS HYBRIDE	BUS DIESEL
Energie grise pour la production	GWh	0.5	0.5	0.45
Durée de vie	années	20	12	10
Energie grise par année	MWh/an	25	42	45
Electricité	kWh/km	3.2		
Carburant	l/km		45	60
Consommation totale du véhicule sur la durée de vie (admis 100'000 km/an)	GWh	6.4	4.8	5.5
Energie grise / consommation totale	%	7.2	9.4	7.6

Tableau 8 : Bilan énergétique des trois modes de propulsion

Enfin, le rayonnement électrique est moyen pour le trolleybus (effet des lignes de contact et du moteur électrique à l'intérieur du véhicule), moyen pour le bus hybride (effet du moteur électrique) et inexistant pour le bus diesel.

	TROLLEYBUS	BUS HYBRIDE	BUS DIESEL
Critère	donnée	donnée	donnée
émissions de NO _x	aucune	g/kWh (Euro V: < 2.0 g/kWh)	g/kWh (Euro V: < 2.0 g/kWh)
émissions de PM	aucune	faibles	moyennes à faibles
émissions de CO ₂	mix suisse : 0 mix européen : 0.38kg/km, TTW 0.48kg/km, WTT	1.20kg/km (TTW) 1.51kg/km (WTT)	1.68kg/km (TTW) 2.1kg/km (WTT)
bilan en termes d'énergie grise	0.5GWh (absolu) 25MWh/an	0.5GWh (absolu) 42MWh/an	0.45GWh (absolu) 45MWh/an
rayonnement électrique	moyen	moyen	très faible à inexistant

Tableau 9 : Comparaison entre les trois modes de propulsion : aspects liés à l'environnement

Intégration urbaine

L'impact visuel de la ligne aérienne de contact, des accroches et des mâts est important et peut affecter certaines perspectives, notamment dans l'environnement chaux-de-fonnier classé au patrimoine de l'UNESCO.

L'impact sonore à l'extérieur des véhicules est lié au fonctionnement du moteur thermique dans le bus diesel (exclusivement) et dans le bus hybride lorsque celui-ci est enclenché. Le trolleybus génère moins de bruit, selon des mesures entre 69 dB(A) et 72 dB(A); des valeurs fortement inférieures au niveau de bruit ambiant. Ce point peut également être un inconvénient en termes de sécurité dans les zones piétonnes, par exemple, lorsque le véhicule n'est pas perçu par les piétons (ce qui n'est pas le cas à La Chaux-de-Fonds).

Les émissions sonores maximales du bus diesel sont produites en accélération et en montée. Les alentours des arrêts et des montées subissent donc de plus fortes nuisances sonores. Actuellement, le bruit émis par les bus d'une puissance supérieure à 150 kW est limité par la loi à 80 dB(A) mesuré à une distance de 7,5 m. Dès 2014, les normes européennes imposeront la valeur limite de 74 dB(A) pour les nouveaux véhicules. Une réduction de 6 dB signifie quatre fois moins de bruit.

Le bus hybride a trois modes de propulsion : purement électrique, mixte diesel-électrique ou diesel seul. Les caractéristiques liées au bruit sont différentes entre le type série et le type parallèle :

- hybride en série :
 - bruit similaire au trolleybus en traction purement électrique (accélération, à plat, montée) et à la récupération (freinage, descente);
 - bruit similaire au bus diesel seulement pour recharger la batterie lorsqu'elle ne se recharge pas par récupération (environ de 25% du temps en action, peut augmenter à environ 40% en cas de climatisation maximale en été);
 - plusieurs régimes de charge de la batterie, et donc d'enclenchement du moteur diesel, sont possibles : commandés par le chauffeur, commandés automatiquement par des informations relatives à la topographie (par GPS, par exemple) ou/et commandé par le niveau de charge de la batterie;
- hybride parallèle : en général, le moteur diesel tourne toujours. Il produit donc du bruit dès qu'une puissance élevée est sollicitée, à la montée, à haute vitesse et pour charger la batterie. Le régime est commandé automatiquement. C'est le cas des véhicules TransN.

Cependant, le moteur diesel des bus hybrides est moins puissant dans le but de réduire le poids du véhicule et la consommation de carburant. Un moteur plus petit génère des fréquences sonores plus hautes qui ne dépassent pas les limites exigées, mais semblent être plus gênantes pour les passagers et l'environnement. Les fournisseurs de bus hybrides utilisent une encapsulation du moteur diesel pour réduire cette problématique.

La **lisibilité du réseau de transports publics** est plus forte pour les usagers et pour les automobilistes lorsque les véhicules sont guidés. Les lignes aériennes (pour le trolleybus) sont présentes en permanence et marque le passage du bus.

	TROLLEYBUS	BUS HYBRIDE	BUS DIESEL
Critère	donnée	donnée	donnée
valorisation de l'infrastructure urbaine (impact visuel)	moyenne	sans effet	sans effet
impact sonore (bruit extérieur au véhicule)	69 à 72db à 7.5m	similaire au trolleybus en exploitation purement électrique, moyen avec moteur diesel en action	valeur limite: 80db à 7.5m (bus articulé)
lisibilité pour l'usager / l'automobiliste	bonne	faible	faible

Tableau 10 : Comparaison entre les trois modes de propulsion : aspects liés à l'intégration urbaine et au bruitConfort du passager

A l'intérieur du véhicule, le bruit du moteur électrique est faible (trolleybus et bus hybride). Par contre, le bruit du moteur diesel, lorsque le passager est situé à proximité est plus élevé (bus hybride et bus diesel). Le confort est similaire dans les trois types de véhicules, à moyenne d'âge constante. L'usager ayant tendance à préférer un véhicule jeune à un véhicule ancien, la durée de vie du trolleybus est donc un inconvénient pour ce point.

Le trolleybus, plus lourd que le bus hybride ou diesel, peut transporter moins de passagers selon les permis de circulation des véhicules.

	TROLLEYBUS	BUS HYBRIDE	BUS DIESEL
Critère	donnée	donnée	donnée
bruit intérieur du véhicule	faible	comparable au bruit à l'extérieur dans la proximité du moteur diesel	comparable au bruit à l'extérieur dans la proximité du moteur diesel
nombre de places assises (Solaris Trollino / Urbino 18 - MB Citaro, articulés)	50	43	52
nombre de places totales	128	143	168

Tableau 11 : Comparaison entre les trois modes de propulsion : aspects liés au confort du passager

Confort de conduite

Le confort de conduite est indépendant du mode de propulsion. Par contre, lors de manifestation ou de perturbation de ligne, la conduite du trolleybus est plus difficile (déperchage par exemple).

Enfin, la conduite du trolleybus peut se faire avec un permis de conduire propre au réseau sur lequel le véhicule est utilisé, acquis en interne. Ce permis ne permet pas de conduire d'autres véhicules. Par contre, le permis bus est interoperable.

	TROLLEYBUS	BUS HYBRIDE	BUS DIESEL
Critère	donnée	donnée	donnée
facilité de conduite en mode régulier	aisée	très bonne	bonne
facilité de conduite en mode dégradé	difficile	aucun impact	aucun impact
formation des conducteurs sur le parc de véhicules	non compatible	compatible	compatible

Tableau 12 : Comparaison entre les trois modes de propulsion : aspects liés au confort de conduite

Aspects institutionnels

Le choix politique a été de renoncer au trolleybus et d'acquérir des véhicules hybrides (7 véhicules en circulation), pour faciliter l'exploitation des véhicules et continuer à promouvoir une énergie électrique. La technologie électrique confère une bonne image à la Ville de La Chaux-de-Fonds. Le trolleybus y contribue fortement. Le bus hybride également en raison de sa propulsion à double motorisation. Enfin, la suppression de la ligne aérienne a pour effet de valoriser certains espaces urbains de qualité comme la place de la Gare ou l'avenue Léopold Robert.

	TROLLEYBUS	BUS HYBRIDE	BUS DIESEL
Critère	donnée	donnée	donnée
choix politique	renoncement au trolleybus	acquisition de la technologie hybride	pas de volonté de promouvoir ce mode
image de la ville	bonne	bonne	moyenne

Tableau 13 : Comparaison entre les trois modes de propulsion : aspects institutionnels

4.3 Notation des critères étudiés

Les différents critères sont évalués par une note de 1 à 5 permettant de comparer les trois modes de propulsion entre eux. Ces notes représentent les caractéristiques suivantes :

- 1 : extrêmement défavorable;
- 2 : défavorable;
- 3 : sans effets;
- 4 : favorable;
- 5 : extrêmement favorable.

Cette évaluation permet de faire ressortir les impacts globaux, mais surtout ceux liés aux différentes thématiques traitées, ainsi qu'aux acteurs concernés.

4.4 Evaluation des impacts par thématique

4.4.1 Aspects financiers

L'évaluation est menée dans le tableau ci-dessous.

Critère	TROLLEYBUS		BUS HYBRIDE		BUS DIESEL	
	donnée	note relative du critère	donnée	note relative du critère	donnée	note relative du critère
Aspects financiers		3.3		3.8		4.0
Coûts liés au véhicule		3.2		4.0		4.3
coût d'acquisition	sFr. 1'160'000	2	sFr. 710'000	4	sFr. 520'000	5
coût de l'énergie	0.60 CHF/km	5	0.62 CHF/km	4	0.68 CHF/km	2
coûts d'entretien et de maintenance	1.03 CHF/km	2	0.68 CHF/km	4	0.60 CHF/km	5
amortissement	7%	3	8%	4	9%	5
durée d'utilisation du véhicule	16-22 ans	5	10-12 ans, durée de vie de la batterie d'environ 6 ans	4	10-13 ans	4
plan d'investissement (véhicule + équipement, sans dépôt)	élevé	2	moyen	4	faible	5
Coûts liés à l'équipement		3.4		3.6		3.6
coût de la pose de la ligne de contact	350'000 CHF/km	3	-	4	-	4
amortissement de la ligne de contact	5%	3	-	4	-	4
coût de la rénovation de la ligne de contact	sFr. 2'500'000	3	-	4	-	4
coût du démontage de la ligne de contact sur l'ensemble du réseau de La Chaux-de-Fonds	pas nécessaire	5	sFr. 600'000	1	sFr. 600'000	1
coûts d'entretien et de maintenance (ligne de contact)	0.88 CHF/km	3	-	5	-	5

Tableau 14 : Evaluation des aspects financiers

Sur la base des coûts liés au véhicule et à l'équipement pour les différents modes de propulsion, il ressort que le bus diesel est globalement plus avantageux que le bus hybride et surtout que le trolleybus.

Les caractéristiques des modes "hybride" et "diesel" sont similaires sur les aspects liés à l'équipement, en l'absence d'infrastructure spécifique sur le réseau.

4.4.2 Aspects consommation / exploitation

L'évaluation est menée dans le tableau ci-dessous.

Critère	TROLLEYBUS		BUS HYBRIDE		BUS DIESEL	
	donnée	note relative du critère	donnée	note relative du critère	donnée	note relative du critère
Consommation / exploitation		3.7		4.2		3.9
Consommation d'énergie		4.7		3.3		1.8
consommation	2.4 - 3.2 kWh/km (équivalent 30 l/100 km)	5	45-60 l/km	4	60-70 l/100km	1
efficacité énergétique	env. 80%	5	env. 45%	4	env. 30%	1
dépendance par rapport à l'augmentation du prix de la matière première	très faible	5	faible	2	forte	1
disponibilité de l'énergie	élevée	4	élevée	3	moyenne à long	2
maturité de la technologie	très bonne	5	moyenne	2	très bonne	5
récupération d'énergie (freinage)	moyenne	4	très bonne	5	pas possible	1
Exploitation		2.8		4.5		4.8
impact climatique (neige, givre,...)	fort	2	moyen, avec les véhicules acquis (un essieu moteur)	4	faible	5
impact topographique	bien adapté	5	adapté	4	bien adapté	5
flexibilité - adaptativité du réseau pour événement ponctuel	très faible sans modification de l'infrastructure	1	bonne	5	bonne	5
ancienneté du parc	12,5 ans	3	1 an	5	5,7 ans	4
Effets sur le développement du réseau		3.7		4.7		5.0
concurrence des constructeurs	forte	5	moyenne	4	forte	5
infrastructure, extension de ligne	contraignante	2	aucune	5	aucune	5
demande de concession	nécessaire	4	aucune	5	aucune	5

Tableau 15 : Evaluation des aspects consommation / exploitation

Du point de vue énergétique, les avantages sont plus fortement marqués pour le trolleybus, devant le bus hybride et le bus diesel.

Par contre, sur les aspects exploitation et développement du réseau, les bus hybrides et diesel présentent des caractéristiques très proches, bien plus avantageuses que les trolleybus.

Globalement, sur cette thématique, le bus hybride présente le plus d'avantages.

4.4.3 Aspects qualité de vie / environnement / institutionnel

L'évaluation est menée dans le tableau ci-dessous.

Critère	TROLLEYBUS		BUS HYBRIDE		BUS DIESEL	
	donnée	note relative du critère	donnée	note relative du critère	donnée	note relative du critère
Qualité de vie / environnement / institutionnel		3.8		3.6		2.9
Environnement		4.4		2.6		2.2
émissions de NOx	aucune	5	g/kWh (Euro V: < 2.0 g/kWh)	3	g/kWh (Euro V: < 2.0 g/kWh)	2
émissions de PM	aucune	5	faibles	3	moyennes à faibles	2
émissions de CO2	mix suisse : 0 mix européen : 0.38kg/km, TTW 0.48kg/km, WTT	5	1.20kg/km (TTW) 1.51kg/km (WTT)	2	1.68kg/km (TTW) 2.1kg/km (WTT)	1
bilan en termes d'énergie grise	0.5GWh (absolu) 25MWh/an	5	0.5GWh (absolu) 42MWh/an	2	0.45GWh (absolu) 45MWh/an	1
rayonnement électrique	moyen	2	moyen	3	très faible à inexistant	5
Intégration urbaine et bruit		4.3		3.7		3.0
valorisation de l'infrastructure urbaine (impact visuel)	moyenne	3	sans effet	5	sans effet	5
impact sonore (bruit extérieur au véhicule)	69 à 72db à 7.5m	5	similaire au trolleybus	4	valeur limite: 80db à	2
lisibilité pour l'usager / l'automobiliste	bonne	5	faible	2	faible	2
Confort du passager		3.7		2.7		2.3
bruit intérieur du véhicule	faible	5	comparable au bruit à l'extérieur dans la proximité du moteur diesel	2	comparable au bruit à l'extérieur dans la proximité du moteur diesel	1
nombre de places assises (Solaris Trollino / Urbino 18 - MB Citaro, articulés)	50	3	43	3	52	3
nombre de places totales	128	3	143	3	168	3
Confort de conduite		3.0		4.7		4.3
facilité de conduite en mode régulier	aisée	5	très bonne	5	bonne	4
facilité de conduite en mode dégradé	difficile	2	aucun impact	5	aucun impact	5
formation des conducteurs sur le parc de véhicules	non compatible	2	compatible	4	compatible	4
Aspect institutionnel		3.5		4.5		2.5
choix politique	renoncement au trolleybus	2	acquisition de la technologie hybride	5	pas de volonté de promouvoir ce mode	3
image de la ville	bonne	5	bonne	4	moyenne	2

Tableau 16 : Evaluation des aspects qualité de vie / environnement / institutionnel

Du point de vue environnemental, le trolleybus est le meilleur mode de propulsion.

Pour les aspects liés à l'intégration urbaine et au confort de conduite, le bus hybride présente quelques avantages supplémentaires par rapport au trolleybus. L'image du véhicule électrique peu bruyant est combinée avec un impact visuel (lignes de contact) moins présent.

Le trolleybus est recommandé pour cette thématique liée à la qualité de vie au sens large.

4.4.4 Synthèse de l'évaluation

L'évaluation des différentes thématiques peut être représentée dans le graphe suivant.

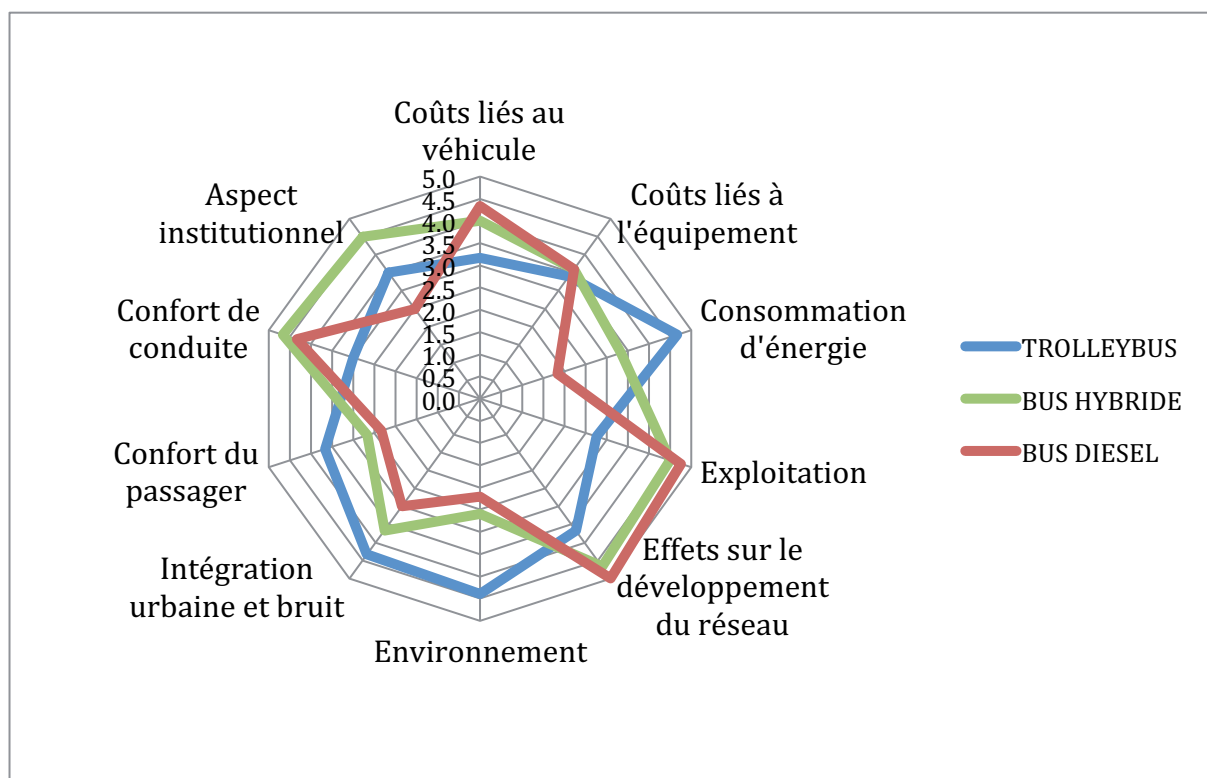


Figure 4 : Synthèse de l'évaluation

Chaque mode de propulsion présente des avantages liés à ces caractéristiques intrinsèques :

- le **trolleybus** est plus performant concernant la consommation d'énergie, l'environnement et le confort du passager, mais avec des coûts plus élevés et une exploitation plus contrainte;
- le **bus diesel** présente des avantages pour l'exploitation et les coûts, tout en étant moins performant sur la consommation d'énergie et sur l'environnement;
- le **bus hybride** est globalement positionné entre le trolleybus et le bus diesel, avec les avantages environnementaux et énergétiques de la motorisation électrique et l'autonomie de la motorisation diesel.

4.5 Evaluation des impacts par acteur concerné

4.5.1 Ville de La Chaux-de-Fonds

Le patrimoine de la Ville de La Chaux-de-Fonds pourrait être davantage valorisé par la suppression des lignes aériennes de contact, qui permettrait d'offrir des perspectives dégagées des axes et des bâtiments. Dans cette optique, la nouvelle place de la Gare sera d'autant mise en valeur.

Par rapport à la satisfaction des objectifs de maîtrise des coûts d'exploitation et d'image liée à des véhicules "propres", **le bus hybride est le mode de propulsion le plus avantageux du point de vue de la Ville**

4.5.2 Clients des transports urbains

Le passager souhaite avant tout des transports publics de qualité par le confort intérieur et fiable dans le temps de parcours et dans la fréquence. L'aspect du bruit est important et avantage le trolleybus avec un moteur électrique seul. D'autre part, l'identification visuelle avec la ligne de contact représente un marqueur fort dans la ville de la présence (et du passage) du transport public.

A ancienneté du parc similaire, **le trolleybus est légèrement plus favorable au client**. Par contre, comme son renouvellement est plus espacé que pour les bus hybrides et diesel, une impression de "vieux bus" peut intervenir après une dizaine d'années de service, par le design du véhicule mais également par le confort ou les aménagements intérieurs (système d'informations aux voyageurs par exemple).

Par contre, si les gains financiers réalisés par l'abandon du trolleybus peuvent être réinvestis dans des améliorations de service du réseau (amélioration de la cadence ou de la desserte) **le client sortira gagnant du passage au bus hybride**.

4.5.3 TransN

L'exploitant TransN a étudié et proposé le remplacement du parc de trolleybus vers le parc de bus hybrides pour différentes raisons, essentiellement guidées par les conditions d'exploitations en hiver (et pendant les périodes de froid) et durant les manifestations dans le centre de la ville. La période de chantier du réaménagement de la place de la Gare et le déplacement des quais pour les lignes de bus ont été le déclencheur de cette modification du parc. Ainsi, sept bus hybride circulent depuis 2012 sur le réseau TransN à La Chaux-de-Fonds.

L'analyse des critères de comparaison entre les différents modes de propulsion montre que le trolleybus présente effectivement de nombreux inconvénients pour l'exploitant, en raison de sa faible souplesse en cas de déviation de ligne, de problèmes d'exploitation durant les périodes de froid, mais également par des coûts d'entretien élevés.

La gestion du parc de véhicule sera simplifiée si le trolleybus est abandonné puisqu'il est nécessaire d'assurer des bus diesel supplémentaires en cas de déviation de ligne de trolleybus. Avec un parc de bus sans trolleybus, ces bus supplémentaires pourraient être directement inclus dans les réserves de véhicules.

L'exploitation du trolleybus coûte plus cher que celle des autres modes étudiés. Aussi, il est envisageable de réinvestir les gains dans une amélioration de l'offre comme des fréquences plus élevées ou des extensions de lignes pour desservir des quartiers mal ou peu desservis.

Le bus hybride se rapproche donc de certaines caractéristiques de conduite du trolleybus par la motorisation et le bruit, et du bus diesel par la souplesse d'exploitation.

Aussi, pour TransN, une exploitation par une flotte hybride est plus intéressante.

5.2 Recommandations

La suppression du trolleybus à La Chaux-de-Fonds ?

L'utilisation du trolleybus dans une ville en pente présente de nombreux avantages déjà cités, comme les performances dans les pentes en montée avec un bruit faible en raison des caractéristiques du moteur électrique. Par contre, ce mode ne peut pas pleinement être valorisé : la récupération d'énergie réinjectée dans le réseau subit de nombreuses pertes en raison du faible nombre de trolleybus circulant sur le réseau.

L'altitude de la ville (1'000 mètres environ) engendre des conditions météorologiques difficiles pour l'exploitation du trolleybus. En effet, le givre est présent entre 4 et 6 mois dans l'année sur les lignes aériennes de contact nécessitant, avant le début du service, l'intervention de véhicules spécialisés équipées de puissants dégivrants. La neige et le verglas ont des impacts plus faibles sur le réseau de trolleybus en raison de la motorisation des véhicules permettant le franchissement des pentes.

Les trolleybus ne permettent pas de dévier facilement de leurs itinéraires initiaux, en raison du guidage de la ligne aérienne. Cet état est pénalisant lors d'événements qui se déroulent sur l'itinéraire du bus (Braderie, Carnaval,...), qui nécessitent la déviation des lignes et la mise en place de véhicules de remplacement; les trolleybus n'ont en effet pas une grande autonomie de circulation hors ligne aérienne.

Même si la ligne aérienne indique la présence du transport public, elle a un fort impact visuel sur les perspectives et les bâtiments, qui pourraient davantage être mis en valeur en lien avec l'inscription au patrimoine mondial de l'UNESCO de la Ville de La Chaux-de-Fonds.

Le parc de trolleybus de La Chaux-de-Fonds est trop petit pour permettre une exploitation entière avec ce mode. Or, il s'avère que l'utilisation de ce mode est la plus coûteuse sur une période de 20 ans (durée de vie du trolleybus) en comparaison avec les autres modes de propulsion étudiés. Une meilleure utilisation des ressources financières par l'abandon du trolleybus permettrait de développer le réseau TransN de La Chaux-de-Fonds pour améliorer son fonctionnement, tout en garantissant un budget équivalent.

Enfin, dans le cadre du réaménagement de la place de la Gare, la nécessité de la suppression des lignes de contact durant la période des travaux constitue une forte contrainte à l'exploitation des trolleybus qu'il convient de lever par l'introduction de véhicules non guidés.

Ces différents arguments montre que **la présence du trolleybus à La Chaux-de-Fonds pose de nombreux problèmes d'exploitation au quotidien. La suppression du trolleybus peut donc être envisagée pour autant que les solutions alternatives permettent de répondre aux objectifs environnementaux, d'exploitation et de coûts recherchés par les différents acteurs** (ville, exploitant, usagers).

Bus hybride ou thermique ?

Le **bus diesel "conventionnel"** est le véhicule le moins coûteux à l'achat et à l'exploitation. Il offre également, avec la norme Euro 6 en vigueur dès le 1^{er} janvier 2014 (et dont les premiers véhicules sont déjà sortis d'usine en 2013), des niveaux de pollution émise très fortement réduits par rapport aux modèles antérieurs (Euro 5 notamment). Ce mode de propulsion **est donc essentiellement intéressant du point de vue financier**.

Pour limiter la pollution et le bruit toujours présent avec un moteur thermique, **l'utilisation du bus hybride est donc la solution la plus intéressante**, car elle permet de maîtriser la consommation énergétique. Le gain financier de la technologie hybride est de 370'000.-/an par rapport au trolleybus en conservant les avantages du moteur électrique. Par contre, il est plus élevé de 110'000.-/an que le bus diesel.

Les véhicules aujourd'hui présents à La Chaux-de-Fonds sont des bus hybrides "en parallèle", qui laissent tourner le moteur diesel en permanence à côté du moteur électrique, générant du bruit et des polluants. Par contre, le bus hybride "en série" diminue voire supprime le bruit du moteur thermique lorsque celui-ci ne fonctionne pas.

Les caractéristiques de l'hybride "en série" pour La Chaux-de-Fonds devraient être les suivantes :

- une puissance nécessaire de plus de 200 kW;
- la totalité du couple et de la puissance est fournie par les moteurs électriques et la batterie (pas d'apport du moteur thermique);
- la puissance maximale peut être entièrement récupérée (descente, freinage);
- une batterie avec une capacité utilisable supérieure à 10kWh est suffisante pour effectuer les montées des lignes étudiées en mode purement électrique;
- la durée de vie de 6 ans (ou plus?) de la batterie (100'000 cycles) est réalisable avec un type de batterie récent (Li-Ion);
- la charge de la batterie à l'aide du moteur diesel doit être optimisée et réalisée dans les secteurs non sensibles au bruit du moteur thermique;
- le moteur diesel est encapsulé pour réduire le bruit à l'extérieur et à l'intérieur;
- le moteur diesel remplit la norme Euro 6 et dispose d'un système DéNOx (dénitrification des fumées) et d'un filtre à particules;
- deux essieux entraînés, avec 2 ou 4 moteurs électriques, sont recommandés pour les conditions hivernales.

Par rapport au trolleybus, le bus hybride présente essentiellement deux inconvénients :

- la dissipation de l'énergie du moteur diesel est insuffisante pour fournir la puissance maximale du chauffage en cas de basse température;
- la climatisation augmente la consommation de carburant en raison de la nécessité d'avoir un compresseur entraîné par le moteur diesel ainsi que des ventilateurs électriques.

Pour le groupement
TRANSITEC
Ingénieurs-Conseils SA

Haute école spécialisée bernoise
Institut Energie et Mobilité

J.-M. Dupasquier
Directeur

S. Fréchet
Chef de projet

M. Moser

B. Gerster

J. Czerwinski

Lausanne, le 8 novembre 2013

Annexes

Annexe 1 : Bibliographie

- Bus hybride vs diesel
 - Programme de démonstration en transport urbain – Transports Canada – Société de transport de Montréal – mars 2009
 - Fuel and Technology Alternatives for Busses – Nylund Nils-Olof, Koponen Kati – VTT – Espoo – 2012
- Trolleybus vs diesel / CNG / biogaz
 - Verkehrsbetriebe Schaffhausen – Zukünftige Zusammensetzung der VBSH-Busflotte – Analyse verschiedener Antriebsarten – INFRAS – 2008
 - Busevaluation Lugano : Umweltaspekte und Wirtschaftlichkeit – INFRAS – 1999
- Bus hybride
 - Czerwinski Jan, Comte Pierre: Bericht über die Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs von 2 Hybridbussen über ein Jahr; BFH-TI, Biel; 2012
- Bus électrique
 - TOSA – Genève - Présentation Conférence de presse Cleantech - mai 2012
- Divers documents
 - Données techniques TransN (2010-2013)
 - Bewertung des Einsatzes von Hybridantrieben für LKW und Stadtbusse – E. Hipp, G. Lexen (MAN Nutzfahrzeuge AG, München) – VDI Berichte 1876 – 2005
 - Revue spécialisée Stadtverkehr (différents numéros)
 - Projet Trolley (promoting electric public transport) financé par le ERDF : www.trolley-project.eu

Annexe 2 : Description du mode "bus électrique avec charges en ligne"

L'évolution du bus électrique à batterie, qui se recharge au dépôt, tend vers une alimentation des batteries par des charges ponctuelles en ligne (aux terminus et aux arrêts). De cette manière, le bus circule en tout électrique de manière autonome entre les arrêts et sans ligne de contact. Ce processus, appelé **biberonnage**, est encore en phase d'expérimentation chez les constructeurs. Les systèmes existants sont les suivants :

- **charge par le toit.** Ce système semble faire l'objet du plus grand nombre d'expérimentations, car il combine les avantages du contact aérien avec les inconvénients de la batterie électrique. Ainsi, pour combler la faible autonomie de la batterie, celle-ci est fréquemment rechargée aux terminus et aux arrêts principaux par un contact entre le véhicule et la borne de chargement. Le temps de charge est d'environ 15 secondes aux arrêts et de 3 minutes aux terminus (données TOSA, Genève). Les TPG, ABB et les SIG (Services industriels) sont en phase de test pour un tel système (voir photo ci-dessous). Des véhicules Rampini circulent avec un équipement Siemens dans le centre-ville de Vienne en Autriche. En Suède, le projet Artic Whispers est en cours dans la ville d'Umeå.



TOSA – Genève, 2013

- **charge par la chaussée.** Bombardier a développé le système par induction Primove (également disponible sur le tramway), qui permet la charge sans contact de la batterie dès que le véhicule est positionné à son arrêt par un système intégré dans la chaussée. Mannheim, en Allemagne, a équipé l'une de ces lignes avec ce système. Le système par induction existe aussi à Turin.

Annexe 3 : Bilan financier comparé des trois modes de propulsions pour une exploitation exclusive avec l'un des modes sur les lignes 1, 2 et 4 du réseau TransN de La Chaux-de-Fonds, sur une période de 20 ans

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	TOTAL sur 20 ans (renouvellement complet du parc trolleybus)	TOTAL annuel sur 20 ans
(coûts HT en CHF)																								
Tout Trolleybus	total	3'661'346	17'277'692	20'720'837	20'440'383	20'159'929	19'879'475	19'842'621	19'805'766	19'768'912	19'732'058	23'175'204	22'894'750	22'614'295	22'333'841	22'053'387	21'772'933	22'872'879	23'972'824	25'072'770	26'172'716	27'272'662	27'272'662	
(par année)		3'661'346	13'616'346	3'443'146	-280'454	-280'454	-280'454	-36'854	-36'854	-36'854	-36'854	3'443'146	-280'454	-280'454	-280'454	-280'454	-280'454	1'099'946	1'099'946	1'099'946	1'099'946	1'099'946		1'364'000
véhicules (durée de vie : 20 ans)	6	0	11	3	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	
investissement véhicules	0	0	12'760'000	3'480'000	0	0	0	0	0	0	0	3'480'000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19'720'000
investissement ligne de contact	0	440'000	135'000	135'000	135'000	135'000	135'000	135'000	135'000	135'000	135'000	135'000	135'000	135'000	135'000	135'000	135'000	135'000	135'000	135'000	135'000	135'000	135'000	3'140'000
investissement place de la Gare	0	2'500'000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2'500'000
coûts d'entretien/maintenance	0	110'066	110'066	110'066	110'066	110'066	110'066	110'066	110'066	110'066	110'066	110'066	110'066	110'066	110'066	110'066	110'066	110'066	110'066	110'066	110'066	110'066	110'066	2'311'382
coûts d'exploitation	0	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	17'952'480
amortissement	0	0	0	-893'200	-1'136'800	-1'136'800	-1'136'800	-1'136'800	-1'136'800	-1'136'800	-1'136'800	-1'136'800	-1'380'400	-1'380'400	-1'380'400	-1'380'400	-1'380'400	0	0	0	0	0	0	-16'889'600
amortissement des véhicules circulant en 2013	0	-243'600	-243'600	-243'600	-243'600	-243'600	-243'600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1'461'600

Tout Hybride	total	7'629'945	8'191'890	8'153'834	8'115'779	8'077'724	8'249'669	8'476'614	8'353'558	8'230'503	8'107'448	7'984'393	19'931'338	19'893'282	19'855'227	19'817'172	19'779'117	19'741'062	20'213'006	20'089'951	19'966'896	19'843'841	19'843'841	
(par année)		7'629'945	561'945	-38'055	-38'055	-38'055	171'945	226'945	-123'055	-123'055	-123'055	-123'055	11'946'945	-38'055	-38'055	-38'055	-38'055	-38'055	471'945	-123'055	-123'055	-123'055		992'000
véhicules (durée de vie : 12 ans)	7	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	par rapport au trolley : par an -372000.- -27%
investissement véhicules	0	7'100'000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12'070'000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19'170'000
batterie (durée de vie : 6 ans)	0	0	0	0	0	0	7	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0	0	17
investissement batterie	0	0	0	0	0	0	210'000	300'000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	510'000	0	0	0	0	1'020'000
suppression ligne de contact	0	0	600'000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	600'000
coûts d'entretien/maintenance	0	72'665	72'665	72'665	72'665	72'665	72'665	72'665	72'665	72'665	72'665	72'665	72'665	72'665	72'665	72'665	72'665	72'665	72'665	72'665	72'665	72'665	72'665	1'525'961
coûts d'exploitation	0	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	17'952'480
amortissement	0	0	-568'000	-568'000	-568'000	-568'000	-568'000	-568'000	-568'000	-568'000	-568'000	-568'000	-568'000	-965'600	-965'600	-965'600	-965'600	-965'600	-965'600	-965'600	-965'600	-965'600	-965'600	-14'938'400
amortissement batterie sur 6 ans	0	0	0	0	0	0	-35'000	-85'000	-85'000	-85'000	-85'000	-85'000	-85'000	0	0	0	0	0	0	-85'000	-85'000	-85'000	-85'000	-715'000
amortissement des véhicules circulant en 2013	0	-397'600	-397'600	-397'600	-397'600	-397'600	-397'600	-397'600	-397'600	-397'600	-397'600	-397'600	-397'600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-4'771'200

Tout Thermique	total	5'791'396	6'514'792	6'638'188	6'761'584	6'884'980	7'008'376	7'131'772	7'255'168	7'378'564	7'501'960	12'825'356	16'588'752	16'712'148	16'835'544	16'958'940	17'082'336	17'205'732	17'329'128	17'452'524	17'575'920	17'699'316	17'699'316	
(par année)		5'791'396	723'396	123'396	123'396	123'396	123'396	123'396	123'396	123'396	123'396	5'323'396	3'763'396	123'396	123'396	123'396	123'396	123'396	123'396	123'396	123'396	123'396	123'396	885'000
véhicules (durée de vie : 10 ans)	7	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	
investissement véhicules	0	5'200'000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5'200'000	3'640'000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14'040'000
suppression ligne de contact	0	0	600'000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	600'000
coûts d'entretien/maintenance	0	64'116	64'116	64'116	64'116	64'116	64'116	64'116	64'116	64'116	64'116	64'116	64'116	64'116	64'116	64'116	64'116	64'116	64'116	64'116	64'116	64'116	64'116	1'346'436
coûts d'exploitation	0	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	854'880	17'952'480
amortissement sur 10 ans	0	0	-468'000	-468'000	-468'000	-468'000	-468'000	-468'000	-468'000	-468'000	-468'000	-468'000	-468'000	-795'600	-795'600	-795'600	-795'600	-795'600	-795'600	-795'600	-795'600	-795'600	-795'600	-12'308'400
amortissement des véhicules circulant en 2013	0	-327'600	-327'600	-327'600	-327'600	-327'600	-327'600	-327'600	-327'600	-327'600	-327'600	-327'600	-327'600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-3'931'200

hypothèses :
pour les lignes 1, 2 et 4: 17 véhicules nécessaires, y compris réserve
coûts constants sur la période considérée
kilométrage annuel constant
possibilité d'optimiser certains achats de véhicules par commande groupées (TransN ou autres réseaux)
tout trolleybus : non renouvellement des 7 bus hybrides
tout trolleybus : renouvellement des aiguilles en 2014
tout hybride : suppression des 6 trolleybus
tout thermique : suppression des 6 trolleybus, non renouvellement des 7 véhicules hybrides
tout thermique : uniquement acquisition des véhicules pour les lignes 1, 2 et 4

par rapport à l'hybride : par an -107000.- -11%

Annexe 4 : Simulation des performances des différents modes de propulsion

La simulation du véhicule sur le parcours des lignes 1, 2 et 4 est basée sur les informations suivantes:

- la physique et les données techniques des véhicules;
- le profil des lignes et les positions des arrêts;
- la composition de la chaîne de traction;
- le rendement des composants de la chaîne de traction selon la littérature.

L'équation différentielle qui est résolue numériquement est la suivante :

$$a = \frac{1}{m\rho} (F_{trac} - mgsin(s) - cv^2 - F_c)$$

Avec a : l'accélération
 m : masse du véhicule
 ρ : facteur de correction pour les inerties rotatives
 F_{Trac} : force de traction au niveau de la roue
 $mgsin(s)$: force donnée par la pente
 cv^2 : friction aérodynamique
 F_c : friction Coulomb

La force de traction au niveau de la roue est transformée à l'aide des rendements pour calculer l'énergie et la puissance aux différents points de la chaîne de traction.

Les résultats de la simulation vérifient les hypothèses. L'énergie consommée au niveau des roues est déterminée par trois grandeurs :

- le nombre de phases d'accélération et la vitesse finale atteinte;
- la dénivellation des montées;
- les résistances de roulement et aérodynamiques.

Les résistances de roulement et aérodynamiques sont les pertes dissipées, qui représentent de 32 à 39% de l'énergie consommée sans prendre en considération la récupération d'énergie. La valeur basse correspond au parcours avec la plus forte dénivellation par rapport à la longueur du parcours.

L'énergie d'accélération et l'énergie de potentiel peuvent être récupérées. Les pertes dans la chaîne de traction d'un bus hybride en série de la batterie aux roues et vice-versa réduisent le pourcentage de l'énergie récupérable au niveau de la batterie à environ 65%.

Quelles sont les influences des simplifications de la modélisation actuelle :

- les arrêts forcés par de mauvaises conditions de circulation ou l'absence de priorité des bus aux carrefours ne sont pas pris en considération;
- la vitesse maximale est fixée à 40 km/h, une valeur assez haute qui compense à un certain degré le point précédent (plus d'arrêts forcés, vitesse finale plus basse).

Explication de la simulation

Le profil des pentes est utilisé pour calculer l'énergie potentielle par la dénivellation.

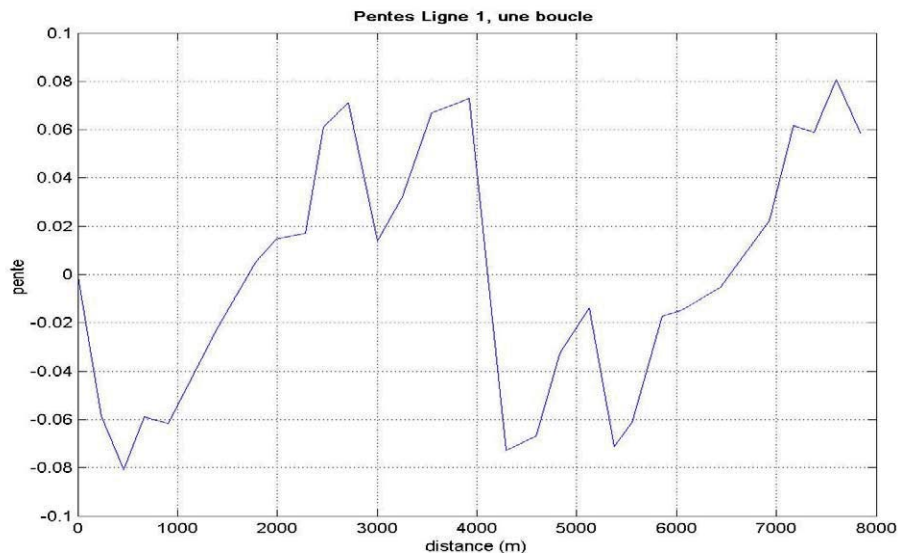


Fig. 1 : Profil de vitesse référencé et réglé

L'accélération et la vitesse seront réglées, le profil de vitesse sert comme référence, l'accélération, la vitesse finale et la décélération sont des paramètres libres dans la simulation

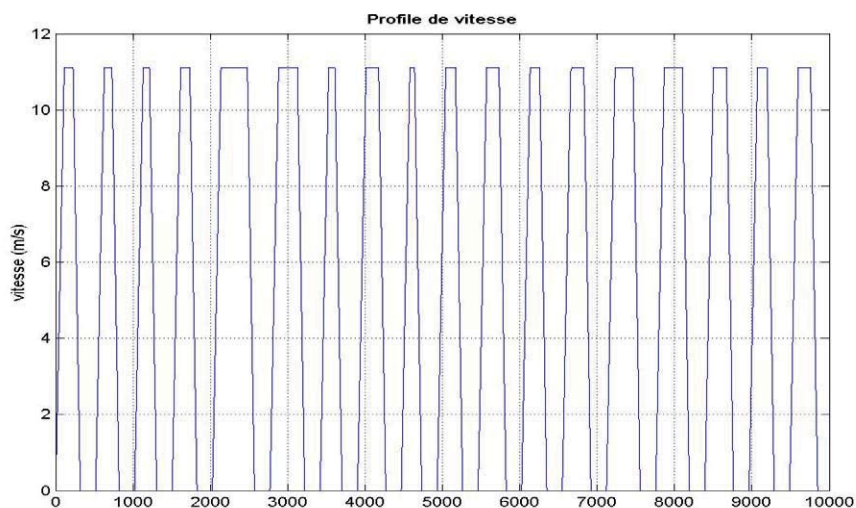


Fig. 2 : Profil de vitesse référencé et réglé

La comparaison entre la référence de vitesse et la vitesse réglée du véhicule simulé sont représentées ci-dessous dans une section du parcours de 10 minutes. L'erreur de trainage, produite par le réglage et la puissance limitée, reste faible.

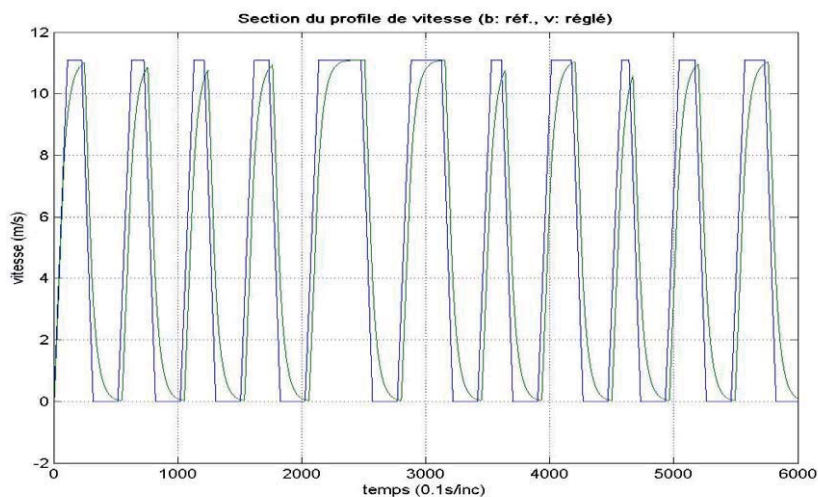


Fig. 3 : Profil de vitesse référencé et réglé

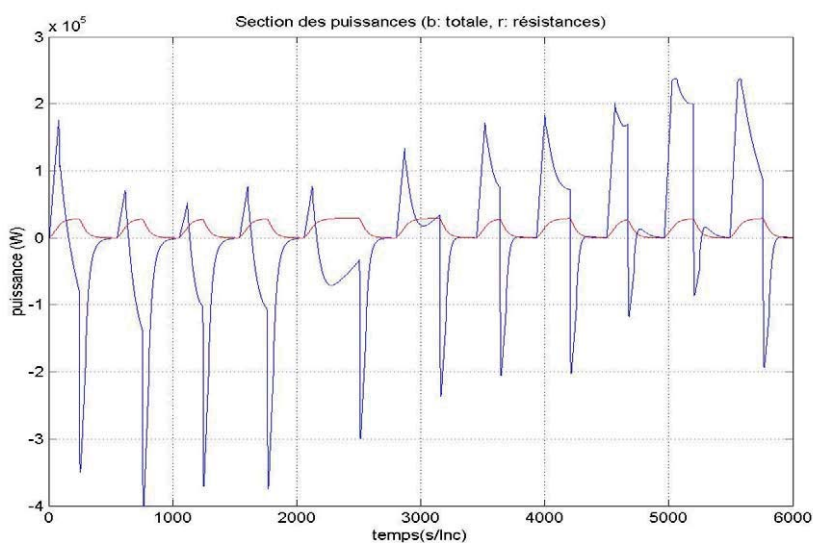


Fig. 4 : Puissances correspondant au profil de vitesse

Comme exemple les puissances correspondant au profil de vitesse sont représentées. Les pointes positives de la courbe bleue marquent l'accélération du véhicule, les pointes négatives la décélération et la courbe rouge la puissance pour compenser les résistances de roulement et aérodynamique.

Comparaison spécifique pour les lignes 1, 2 et 4 à La Chaux-de-Fonds

L'énergie au niveau des roues est calculée à l'aide d'une simulation avec le profil des lignes et les arrêts.

Les données pour la simulation sont :

- Masse du véhicule 2.20E+4 kg
- Pentr = Précup 2.40E+5 W
- V_final 1.11 m/s
- A_plus 1.00 m/s²
- A_minus -1.20 m/s²

Ligne	Long. km	Energie, niveau roue		Trolley sans récup.		Hybride sériel		Diesel		Réduct.
		Entrainement	Récupération	kWh/ 100km	l/100km	kWh/ 100km	l/100km	kWh/ 100km	l/100km	%
1	7.9	6.13E+07	4.05E+07	251.2	25.9	468	48.3	668	68.9	30.0
2	10.2	6.60E+07	4.00E+07	209.5	21.6	415	42.7	557	57.5	25.6
4	9.5	6.93E+07	4.50E+07	236.2	24.3	446	45.9	628	64.8	29.1

Les rendements pour calculer la consommation sont les suivants :

eta	Trolley	Hybride	Diesel
Electronics	0.97	0.97	
El. Mot.	0.94	0.94	
engrenage	0.97	0.97	0.95
roue	0.97	0.97	0.97
batterie		0.94	
diesel		0.38	0.35

Hypothèses :

- le chauffage et la climatisation ne sont pas pris en considération;
- la dissipation du moteur diesel est d'environ 36 kW avec une demande maximale de 50 kW du chauffage (selon estimation de TransN).

La climatisation augmente le temps d'exploitation du moteur diesel, le compresseur pour le refroidissement et consomme de l'électricité pour les ventilateurs.

Annexe 5 : Tableau d'analyse et d'évaluation

Critère	TROLLEYBUS			BUS HYBRIDE			BUS DIESEL					
	donnée	remarque	source	note relative du critère	donnée	remarque	source	note relative du critère	donnée	remarque	source	note relative du critère
Aspects financiers												
Coûts liés au véhicule												
coût d'acquisition		sfr. 1'160'000	véhicule de 18 m.	TransN	2	sfr. 7'10'000	véhicule de 18 m.	TransN	4	sfr. 520'000	véhicule de 18 m.	TransN
coût de l'énergie		0.60 CHF/km	0.19 CHF/kWh	TransN	5	0.62 CHF/km	0.95 CHF/l	base km Cdf. cout	4	0.68 CHF/km	0.95 CHF/l	TransN
coûts d'entretien et de maintenance		1.03 CHF/km		TransN	2	0.68 CHF/km		TransN	4	0.60 CHF/km		TransN
amortissement		7%		TransN	3	8%		TransN	4	9%		TransN
durée d'utilisation du véhicule		16-22 ans		TransN	5	10-12 ans, durée de vie de la batterie d'environ 6 ans		TransN, tpb	4	10-13 ans		TransN
plan d'investissement (véhicule + équipement, sans dépôt)					2	supérieur de 0.1 mio CHF/an (+10%) sur 20 ans par rapport au diesel			4	faible		5
Coûts liés à l'équipement						moyen			3.6			3.6
coût de la pose de la ligne de contact		350'000 CHF/km	simple sens 50% mâts, 50% ancrages, sans aiguilles	TransN	3	-	-	-	4	-	-	4
amortissement de la ligne de contact		5%		TransN	3	-	-	-	4	-	-	4
coût de la rénovation de la ligne de contact		sfr. 2'500'000	place de la Gare la suppression des lignes de contact entraîne automatiquement la suppression de la concession pour exploitation par trolleybus	TransN	3	-	-	-	4	-	-	4
coût du démontage de la ligne de contact sur l'ensemble du réseau de La Chaux-de-Fonds					5	démontage nécessaire sur le réseau			1	démontage nécessaire sur le réseau		1
coûts d'entretien et de maintenance (ligne de contact)		pas nécessaire		TransN / Schaffhausen	3	sfr. 600'000		TransN	5	sfr. 600'000		5
Consommation d'énergie					3.7	135'000 CHF / an			4.2			3.9
Consommation d'énergie					4.7				3.3			1.8
consommation		2.4 - 3.2 kWh/km (équivalent 30 l/100 km)	lié à la topographie de la Chaux-de-Fonds et au climat (base T1 = 9.68kWh)		5	45-60 l/km	topographie de La Chaux-de-Fonds, technologie, style de conduite, climat		4	60-70 l/100km		1
efficacité énergétique		env. 80%	énergie élec. sans récupération (base : 2.4 kWh/km)		5	env. 45%	énergie mec. / avec récupération (base : 4.5 l/100km)		4	énergie mec. / énergie chimique (base : 65 l/100km)		1
dépendance par rapport à l'augmentation du prix de la matière première		très faible	sur base énergie hydraulique		5	faible	-		2	forte		1
disponibilité de l'énergie		élevée			4	élevée	moyen pour diesel, très faible pour électricité		3	moyenne à long terme		2
maturité de la technologie		très bonne	courant injecté dans le réseau lors de freinage ou en descente, mais pas suffisamment de trafic trolleybus pour être réalisés		5	moyenne	assez récente, encore en développement		2	très bonne		5
impact topographique		bien adapté	avec moteur auxiliaire : sur de courtes distances : sans moteur : impossible		1	bonne	alimentation de la batterie lors du freinage et des descentes mais dépend de la technologie et de la conduite (0...40%)		5	bonne		5
flexibilité - adaptabilité du réseau pour événement ponctuel		très faible sans modification de l'infrastructure			3	1 an			5	bonne		4
ancêtre du parc		12.5 ans	valeur 2013 - mi-vie	début	3.7	moyenne	en développement		4.7	forte		5
Effets sur le développement du réseau		forte	nécessite la pose de ligne aérienne, de rails, de transformateur		5	aucune			4	aucune		5
concurrence des constructeurs					4	aucune			5	aucune		5
infrastructure, extension de ligne		contraignante			2	aucune			5	aucune		5
demande de concession		nécessaire			4	aucune			5	aucune		5
Qualité de vie / environnement / institutionnel					3.8				3.6			2.9
Environnement					4.4				2.6			2.2
émissions de NOx		aucune				Euro VI : < 0.45 g/kWh (Euro V : < 2.0 g/kWh)	Théoriquement émissions plus faibles que pour le bus thermique			Euro VI : valeur limite pour le test dynamique ; Emissions faibles par comparaison aux normes précédentes. Implique généralement l'implémentation par le constructeur d'un système de dénitrification des gaz d'échappement (EGR, SCR,...)	étude Espoo	2
émissions de PM		aucune								Euro VI : valeur limite pour le test dynamique : 0.01 g/kWh à la norme Euro VI limite également le nombre de particules émises. Implique l'implémentation par le constructeur d'un filtre à particule (DPF).		1
émissions de CO2		mix suisse : 0.38g/km, TTW 0.48g/km, WTT 0.5GWh (absolu) 25MWh/an	TTW: tank to wheel WTT: well to tank énergie grise par année, recyclage non considéré		5	1.20g/km (TTW) 1.51g/km (WTT)	Proportionnel à la consommation de carburant		2	1.68g/km (TTW) 2.1g/km (WTT)	étude Espoo	1
bilan en termes d'énergie grise			hâcheur produit de l'EMC émis à l'extérieur par les lignes et à l'intérieur du bus		2	0.50Wh (absolu) 42MWh/an	énergie grise par année, recyclage non considéré		2	0.450Wh (absolu) 45MWh/an		1
rayonnement électrique		moenne			2	moyen	hâcheur produit de l'EMC émis à l'extérieur par les lignes et à l'intérieur du bus		3			5
intégration urbaine et bruit					4.3				3.7	très faible à inexistant		3.0
valorisation de l'infrastructure urbaine (impact visuel)		moenne	mâts, ligne de contact, aiguillages, impacts principalement sur le Pod et devant la gare		3	sans effet			5			5
impact sonore (bruit extérieur au véhicule)		69 à 72db à 7.5m	inconvenient en termes de sécurité routière, puisque le véhicule n'est pas identifié		5	similaire au trolleybus en exploitation purement électrique, moyen avec moteur diesel en action	Hybride moderne a un moteur diesel encapsulé, réduit les fréquences hautes gênantes		4	le bus diesel est 4 à 8 fois plus bruyant que le trolleybus ; bruit maximal en accélération et en côte, émissions locales gênantes		2
labilité pour l'usager / l'automobiliste		bonne	identification des lignes aériennes, en plus des arrêts (hors site propre bus). Le passage d'une ligne au mode trolleybus augmente de 10 à 30% la fréquentation en raison de la meilleure labilité		3.7	faible	pas de signe de passage, hormis les arrêts (hors site propre bus)		2	pas de signe de passage, hormis les arrêts (hors site propre bus)		2
Confort du passager			comparable au bruit à l'extérieur, faible sous toutes les conditions, très agréable pour les passagers			comparable au bruit à l'extérieur dans la proximité du moteur diesel	variable, selon le mode de traction et selon la position dans le bus		2.7	comparable au bruit à l'extérieur dans la proximité du moteur diesel		1
bruit inférieur du véhicule		faible		TransN	3	43		TransN	3	valeur limite: 80db à 7.5m (bus articulé)		3
nombre de places assises (Saras Trollino / Urbino 18 - MB Clano, antiques)		50		TransN	3	143		TransN	3	52		3
nombre de places totales		128		TransN	3	143		TransN	3	168		3
Confort de conduite					3.0				4.7			4.3
aisée					5	très bonne	confort supplémentaire avec le moteur électrique		5	bonne		4
facilité de conduite en mode régulier		difficile			2	aucun impact	aucun impact		5	aucun impact		5
formation des conducteurs sur le parc de véhicules		non compatible	permis spécial trolleybus, permis "réseau" en interne mais qui ne permet pas l'interopérabilité		2	comparable	permis bus valable sur tous les véhicules		4	compatible		4
Aspect institutionnel		renoncement au trolleybus	identification à l'énergie entièrement électrique		3.5	acquisition de la technologie hybride	pas de volonté de promouvoir ce mode		4.5	pas de volonté de promouvoir ce mode		2.5
choix politique					2				5			3
image de la ville		bonne			5	bonne	maintien de l'énergie électrique		4	moyenne		2