

Dimensionnement des organes de stockage électriques pour véhicules blindés terrestres à partir de leurs profils de mission

Dominique Dreulle

Ministère de la Défense – Direction Générale de l'Armement (Mindef/DGA) Montreuil-Juigné (49), France

RESUME -L'électrification des véhicules militaires s'accroît fortement depuis une quinzaine d'années. Dans ce contexte d'électrification croissante et de multiplication des consommateurs électriques, une problématique d'optimisation globale des sources d'énergie embarquées mérite d'être soulevée. Les travaux ont pour objectif de développer une méthode de dimensionnement adapté des sources d'énergie des véhicules de combat terrestres à partir de leurs profils d'emploi. La méthode retenue utilise le principe d'un processus de Markov pour modéliser les missions et l'adapte aux spécificités des missions militaires. Ces travaux démontrent ainsi l'intérêt de définir et d'exploiter de nouveaux critères de dimensionnement, différents de ceux classiquement utilisés dans les applications civiles.

Mots-clés—dimensionnement, dispositifs de stockage, profils de mission, véhicules militaires.

NOMENCLATURE

P_{roue}	Puissance utile aux roues (kW).
$P_{aux\ i}$	Puissance utile du ième auxiliaire (kW).
P_{aux}	Moyenne des puissances utiles des auxiliaires (kW).
P_{aero}	Puissance utile des efforts aérodynamiques (kW).
P_{resist}	Puissance utile de résistance au roulement (kW).
P_{pente}	Puissance utile de résistance à la pente (kW).
P_{bf}	Puissance fournie par le dispositif de stockage en phase de roulage avec consommation d'énergie (kW).
P_{br}	Puissance reçue par le dispositif de stockage en phase de roulage avec récupération d'énergie (kW).
F_{roue}	Effort de traction (N).
v	Vitesse du véhicule (km/h et m/s).
m_{eq}	Masse équivalente de translation représentative des moments d'inertie des pièces en rotation (roues, arbres, ...) (kg).
m_v	Masse du véhicule (kg).
α	Angle d'inclinaison de la pente (rd).
R_r	Coefficient de résistance au roulement (N/kg).
ρ	Masse volumique de l'air (kg/m ³).

C_x	Coefficient de résistance aérodynamique.
S	Surface frontale (m ²)
η_{mth}	Rendement du moteur thermique, il est déduit de la cartographie de consommation carburant, il dépend du point de fonctionnement, soit du binôme couple et vitesse de rotation de l'arbre moteur.
η_{ebv}	Rendement de la boîte de vitesse, il dépend du nombre de contacts entre roues dentées, de la lubrification, du rapport de boîte.
η_{int}	Rendement des éléments mécaniques intermédiaires (réducteurs différentiels, réducteurs de roues, paliers de guidage, ...).
$\eta_{aux\ i}$	Rendement du ième auxiliaire.
η_{aux}	Rendement moyen à la puissance moyenne des auxiliaires.
η_{me}	Rendement de la machine électrique, il dépend du point de fonctionnement de la machine, en mode moteur ou générateur, soit du binôme couple et vitesse de rotation de l'arbre moteur.
Ta	Durée totale des temps d'arrêts pour une mission de déplacement furtif (s)

I. INTRODUCTION

1.1. contexte

A l'instar du secteur civil, l'électrification des véhicules militaires s'accroît fortement depuis une quinzaine d'années. De nombreux auxiliaires sont maintenant alimentés ou actionnés électriquement (tourelles, climatisation, boîtes de vitesses, poutre de refroidissement, ...), de nouveaux équipements sont installés (détecteur d'alerte laser, détecteur d'optique pointée, dispositif d'identification au combat, brouilleur, ...). L'ajout d'une propulsion hybride-électrique va nécessiter une puissance électrique embarquée qui pourrait s'élever à plusieurs centaines de kW. Enfin dans un futur un peu plus lointain des armements électriques seront peut être installés à bord entraînant des niveaux de puissance embarquée extrêmement élevés. Toutefois à moyen terme, la propulsion électrique restera la principale consommatrice d'énergie.

Cet intérêt pour les propulsions électriques n'est pas exclusivement motivé, comme pour le secteur civil, par la diminution de la consommation de carburant et ses

conséquences bénéfiques sur l'environnement et les réserves en énergie fossile. La quantité de véhicules concernés, quelques milliers au total, est trop faible pour avoir un impact écologique conséquent. Elle l'est surtout par les avantages opérationnels qu'elles apporteraient (tableau 1). A titre d'exemple on citera la possible création d'un mode furtif, le véhicule se déplaçant uniquement à l'aide de la propulsion électrique.

Dans ce contexte d'électrification croissante et de multiplication des consommateurs électriques, il devient nécessaire de chercher à optimiser les sources d'énergie.

Cet article présente une méthode de pré-dimensionnement des organes de stockage des véhicules de combat terrestres à partir de leurs profils d'emploi.

Les exigences du cahier des charges strictement nécessaires au dimensionnement sont :

- la distance maximale de parcours réalisable en mode furtif, soit 3 kms (I),
- la vitesse maximale souhaitée en mode furtif, soit 30 km/h (II),
- le mode furtif doit pouvoir être activé à tout instant de la mission (III),
- Le véhicule doit pouvoir basculer du mode furtif au mode normal (thermique) à tout moment (IV).

Ces exigences constituent les données d'entrée du processus de dimensionnement. Les conditions (I) et (II) permettront de calculer la capacité des sources de stockage d'énergie en fonction de la distance à parcourir, ainsi que la puissance à fournir. La condition (III) nécessite de connaître le niveau de la réserve d'énergie avant le passage au mode furtif. Enfin la condition (IV) permet de définir le niveau bas du dispositif d'énergie permettant le redémarrage du moteur thermique au plus après 3 kms parcourus en mode furtif.

Tableau 1 : Les enjeux de l'optimisation des sources d'énergie

N°	Enjeux	Commentaires	Satisfaction
1	⬇️ consommation carburant	-enjeu écologique non majeur - chaîne log et autonomie	☺☺
2	⬇️ rejets polluants	-enjeu écologique non majeur - politique écologique globale	☺
3	⬆️ performances de mobilité	- surpuissance transitoires - avantage opérationnel	☺☺☺
4	⬆️ furtivité acoustique	- avantage opérationnel	☺☺☺
5	⬆️ furtivité thermique	- plus opérationnel	☺☺
6	⬆️ disponibilité	- plus opérationnel	☺
7	gestion optimisée des consommateurs	- faire face à l'accroissement de la conso électrique, délestage,	☺☺☺
8	Nouvelle fonction	groupe électrogène	☺
9	faciliter la conception	suppression de contraintes mécaniques	☺

1.2. Bilan des travaux réalisés

1.2.1. Domaine militaire

Les travaux publiés pour le domaine militaire ont été essentiellement réalisés sur le HMMWV de l'armée américaine sur ses versions à propulsion hybride électrique. Ces travaux ont principalement été centrés sur le développement de modèles comportementaux multi-physiques des chaînes de propulsion.

Sur Advanced Vehicle Simulator (ADVISOR) Antonis I. Antoniou [2] compare certaines performances du véhicule (pente, accélération, consommation carburant) à partir de plusieurs stratégies. H. Ed Bargar [3] développe un modèle de propulsion hybride série d'un prototype de HMMWV, baptisé XM1124. Il est créé à partir du logiciel Matlab/Simulink et sa boîte à outils PNGV System AnalysisToolkit (PSAT), et validé sur la base du cycle standard FUDS. Ces travaux mettent en évidence la nécessité de disposer de profils d'emplois plus représentatifs des conditions d'utilisation militaire. Margaret Ducusin [4] montre qu'il est possible de développer avec une bonne précision sur le logiciel AnsoftSimplorer un modèle multi-physique d'une propulsion hybride série d'un HMMWV de l'armée américaine. Elle s'appuie pour cela en données d'entrée, sur les cycles standards UDDS et SAE J227a Schedule D, et sur le franchissement d'une rampe de 60%. Scott Fish [5], modélise deux propulsions hybrides de prototypes de HMMWV, à partir d'un outil spécifiquement développé par The Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA). Les travaux ont pour objectif de valider les modèles standards des composants constituant cette « boîte à outil ». Cette boîte à outils est employée à la modélisation d'architectures de propulsions des véhicules futurs. Les modèles de base sont validés à partir de tests élémentaires (accélérations, franchissement de rampes), en comparant les données de simulation aux données mesurées lors des essais des prototypes. SetaBogoyan [6], réalise à partir du logiciel Matlab/Simulink et sa boîte à outils PNGV System AnalysisToolkit (PSAT) une modélisation dynamique fine de la propulsion hybride du HMMWV dans sa version prototype XM1124. Les données implémentées dans les modèles des composants sont issues des valeurs mesurées, cette démarche permet de calculer les valeurs des variables généralement difficilement accessibles à la mesure, comme les couples moteurs électrique et thermique, l'état de charge de la batterie, Loïc Boulon [12] modélise le Démonstrateur de Propulsion Electrique (DPE) développé par l'armée française, par la méthode MRE(EnergeticMacroscopicRepresentation). Ce modèle multi physique après validation permet d'analyser finement les flux de puissance, l'influence des variables du système et des stratégies de gestion de l'énergie.

Tous ces modèles sont employés en fonction des applications, au calcul des consommations d'énergie, des rejets polluants, pour compléter des mesures lors de test réels, pour simuler le comportement de nouvelles versions de propulsion lors des phases de conception. Les auteurs s'appuient pour cela sur des cycles standards en données d'entrées des simulations. L'emploi de ces cycles pour le domaine militaire présentent deux inconvénients majeurs, ils sont tout d'abord représentatif d'un emploi civil, et ne couvrent qu'un usage unique.

1.2.2. Domaine civil - Cycles standards

Les cycles d'emploi standards sont largement utilisés pour simuler le fonctionnement de propulsions hybrides dans le cadre de différentes approches de dimensionnement en vue de la diminution de la consommation de carburant et des rejets polluants. ChiragDesai [7] utilise un algorithme génétique afin d'optimiser le dimensionnement d'une chaîne de propulsion hybride parallèle, il s'appuie sur le cycle standard UDDS. DominikBuecherl [8] utilise le facteur d'hybridation comme paramètres d'optimisation de la puissance électrique à installer sur une propulsion hybride électrique. Il simule le comportement du véhicule à partir du « New European Driving Cycle ». Jiabin Wang [9] insère et adapte en parallèle d'une propulsion thermique optimisée par « downsizing », une motorisation électrique alimentée par des super-capacités. Le couple du moteur électrique complète à bas régime le couple du moteur thermique. Il utilise le cycle NEDC pour ses travaux. Lei Wang [10] utilise une stratégie basée sur un parcours spécifique que doit respecter le couple du moteur thermique d'une propulsion électrique hybride/parallèle d'un bus. Les simulations sont réalisées à partir du cycle standard ECE, le parcours suivi par le couple du moteur thermique est optimisé pour minimiser la consommation de carburant. J. Solano-Martínez [11] modélise une plateforme mobile lourde baptisée « ECCE » (Electrical Chain Components Evaluation) par la méthode EMR. EMR est une boîte à outil permettant de modéliser « graphiquement » des systèmes multi-physiques. Les éléments du pictogramme sont interconnectés et représentent les fonctions de transfert des différents sous-systèmes. Les modèles développés après une étape de validation par essais, servent à l'étude de lois de gestion de l'énergie. Les auteurs s'appuient pour cela sur le cycle standard NEDC (New European Driving Cycle).

L'utilisation de cycles standards présente l'inconvénient de ne couvrir qu'un usage unique et spécifique, alors que les véhicules dans leurs déplacements sont confrontés à une multiplicité de profils de roulage (urbain, péri-urbain, autoroutier, ...). Cette grande diversité impactant le dimensionnement des organes de propulsion, des travaux sur des approches stochastiques ont émergés.

1.2.3. Domaine civil – approches stochastiques

Ces méthodes permettent de générer une quantité infinie de cycles d'emploi et permettent ainsi de couvrir l'ensemble des cas possibles. Ainsi G. Ripaccioli [13] et Chan-Chiao [14], modélisent le besoin futur en puissance nécessaire au déplacement d'un véhicule par une chaîne de Markov, sous différentes conditions de roulage. Ilya Kolmanovskiy [15], crée une chaîne de Markov à partir de cycle standards, ceci à pour inconvénient de limiter le nombre de transitions d'états et ainsi de dégrader la représentativité des cycles générés aléatoirement. Lars Johannesson [16] remédie à cet inconvénient en construisant la chaîne de Markov à partir d'une grande quantité de données de déplacement mesurées (vitesse, position du véhicule). Gwenaëlle Souffran [17] [18] génère des scénarios aléatoires à partir d'une chaîne de Markov, associant les trois variables que sont la vitesse, l'accélération du véhicule et la pente de la route et assurant la cohérence entre ces trois variables. Jérôme Delanoë [19] développe une méthode d'analyse prévisionnelle et stochastique des consommations électriques de charges

multiples et applique cette méthode aux systèmes embarqués des véhicules militaires de combat. Il établit à partir de grandes quantités de mesures de consommations réalisées lors d'exercices d'entraînements opérationnels, un modèle temporel d'analyse basé sur les fonctions de répartition des consommations en amplitude, en durée de maintien, en probabilité de reconduite, des différentes phases de consommation. Un algorithme de Monte-Carlo peut générer une multitude de scénarios, permettant de dimensionner en amont les sources d'énergie.

1.3. Conclusion

De nombreux travaux proposent des modèles multi-physiques à faible granularité permettant de réaliser des analyses très fines à de très grandes précisions à partir de cycles standards civils. Des méthodes stochastiques ont émergées pour modéliser la multiplicité des profils de roulage rencontrés lors des déplacements routiers des véhicules civils. Cet article présente une méthode stochastique par chaîne de Markov adaptée aux spécificités d'emploi des véhicules militaires. Elle repose sur une modélisation des flux de puissance d'une granularité raisonnable, et des critères spécifiques de dimensionnement.

2. APPLICATION AUX VEHICULES MILITAIRES

2.1. Modèle mécanique du véhicule

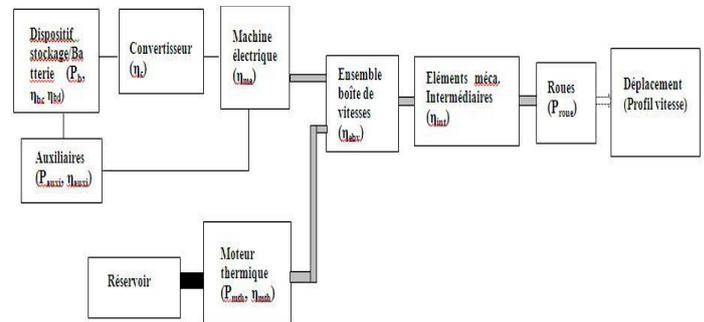


Fig.1 Synoptique des flux de puissance de l'architecture parallèle

Le processus de dimensionnement nécessite l'établissement du modèle mécanique régissant le déplacement du véhicule. Ce modèle est établi pour une architecture de propulsion de type hybride parallèle (Fig.1). Cette propulsion permet de disposer de 7 modes de fonctionnement :

- **Thermique** : énergie uniquement fournie par le moteur thermique,
- **Electrique** : énergie uniquement fournie par les dispositifs de stockage (batteries, ...),
- **Mixte** : énergie fournie pour partie par le moteur thermique et pour partie par les batteries,
- **Récupération d'énergie** : énergie cinétique et potentielle récupérée lors des phases de décélération,
- **Arrêt rechargement** : le moteur thermique recharge les batteries et alimente les auxiliaires,
- **Arrêt silence** : le moteur thermique est arrêté, les auxiliaires et équipements sont alimentés par les dispositifs de stockage,

- **Roulage rechargement** : énergie uniquement fournie par le moteur thermique, pour le déplacement, pour le fonctionnement des auxiliaires et pour le rechargement de la batterie.

La présente étude s'intéresse au mode opérationnel « furtif ». Ce mode opérationnel alterne des phases de roulage en mode « électrique », de décélération ou descente en mode « récupération d'énergie » ainsi que des phases d'arrêt en mode « arrêt silence ».

Le comportement du véhicule est alors décrit par les équations suivantes :

En application du théorème de l'énergie cinétique au véhicule en déplacement :

$$\begin{aligned}
 P_{roue} &= F_{roue} \times v \\
 P_{roue} &= d/dt(1/2m_v v^2 + 1/2m_{eq} v^2) \\
 &+ (m_v \times g \times \sin \alpha + m_v \times R_r \\
 &+ 0.5 \times \rho \times C_x \times v^2 \times S) \times v
 \end{aligned} \quad (1)$$

La prise en compte des flux de puissance (Fig.1) donne pour la fourniture d'énergie (périodes de roulage notées {pf}), l'équation suivante :

$$P_{bf} = P_{roue} / \eta_{bd} \times \eta_c \times \eta_{me} \times \eta_{ebv} \times \eta_{int} + \sum_i P_{aux_i} / \eta_{aux_i} \times \eta_{bd} \quad (2)$$

Faisant l'hypothèse d'une puissance moyenne constante pour les auxiliaires l'équation (2) devient :

$$P_{bf} = P_{roue} / \eta_{bd} \times \eta_c \times \eta_{me} \times \eta_{ebv} \times \eta_{int} + P_{aux} / \eta_{aux} \times \eta_{bd} \quad (3)$$

Pour la récupération d'énergie (périodes de roulage notées {pr}), l'équation suivante :

$$P_{br} = P_{roue} \times \eta_{bc} \times \eta_c \times \eta_{me} \times \eta_{ebv} \times \eta_{int} - \sum_i P_{aux_i} / \eta_{aux_i} \times \eta_{me} \quad (4)$$

Faisant l'hypothèse d'une puissance moyenne constante pour les auxiliaires l'équation (4) devient :

$$P_{br} = P_{roue} \times \eta_{bc} \times \eta_c \times \eta_{me} \times \eta_{ebv} \times \eta_{int} - P_{aux} / \eta_{aux} \times \eta_{me} \quad (5)$$

Les rendements η_{ebv} et η_{int} varient peu, ils dépendent du nombre de contacts des pignons d'entraînement des organes mécaniques de transmission (boîte de vitesses, réducteurs, ...), du lubrifiant, des roulements de guidage, ... Dans le cadre de pré-dimensionnement, ils sont généralement assimilés à des valeurs constantes.

Le rendement η_{me} est déterminé par les caractéristiques moteur, il peut être déduit de la cartographie de rendement. En effet sa valeur fluctue en fonction des points de fonctionnement du système

Le rendement η_c d'un convertisseur varie peu. Il est généralement assimilé à une valeur constante lors de pré-dimensionnement.

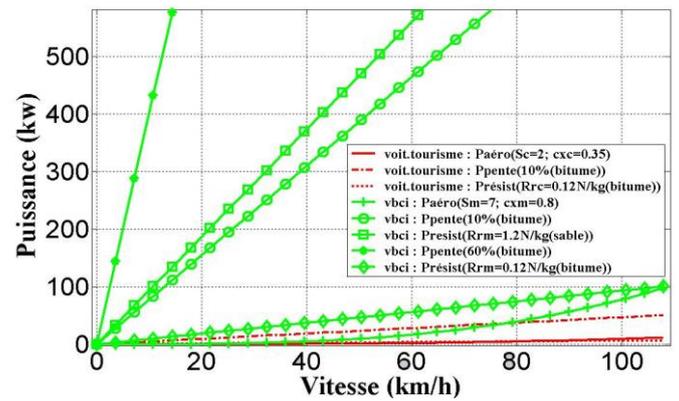
Les rendements de charge et décharge d'un dispositif de stockage η_{bc} et η_{bd} dépendent de différents facteurs et varient en fonction du point de fonctionnement. S'il s'agit d'une batterie, la modélisation fait appel à des formulations

électrochimiques complexes [21][22]. Les modélisations de type « macroscopiques » font intervenir des variables comme la température de fonctionnement, l'état de charge, le courant de charge et décharge, la vétusté pour en déterminer leurs valeurs.

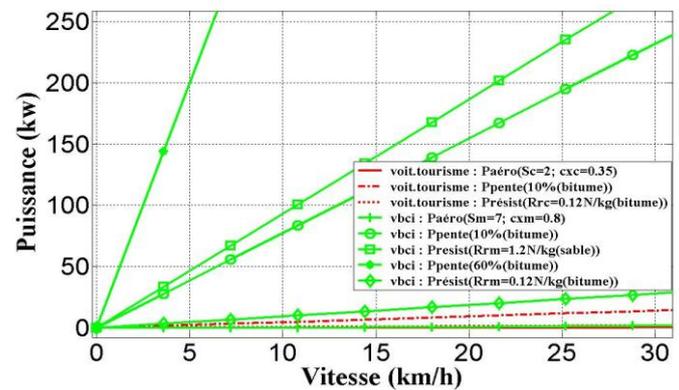
Un véhicule militaire moderne intègre plus de 120 équipements électriques formant l'ensemble des auxiliaires, dont le fonctionnement peut être assimilé généralement en « tout ou rien ». Les rendements η_{aux_i} de ces auxiliaires seront assimilés à des valeurs fixes. Cette hypothèse permet de simplifier l'équation (2) en (3) et l'équation (4) en (5).

L'équation (1) permet d'extraire les différentes puissances mises en jeu dans le déplacement du véhicule. La puissance aérodynamique à vaincre vaut $P_{aero} = 0.5 \times \rho \times C_x \times v^2 \times S \times v$, la puissance due à la résistance au roulement vaut $P_{resist} = m_v \times R_r \times v$, la puissance à fournir (montée), ou restituée (descente), dans une pente vaut $P_{pente} = m_v \times g \times \sin \alpha \times v$. Le calcul de ces différentes puissances permet de tracer la figure 2.

2.2. Spécificité du véhicule militaire



(a) puissances nécessaires aux déplacements



(b) agrandissement fig.1 zone 0-30 km/h

Fig. 2

Au contraire d'une voiture de tourisme dont l'usage sur route se fait principalement sur une large plage de vitesses, selon un coefficient de résistance au roulement relativement constant (bitume) et des variations de pente généralement faibles (sauf

en zone montagneuse), le véhicule militaire est amené à évoluer sur tout type de nature de terrain. Le coefficient de résistance au roulement peut alors varier de 0.12 N/kg sur bitume à 1.2 N/kg sur terrain sableux. Les vitesses d'évolution sont par ailleurs très faibles, les variations de pentes importantes et le niveau de pente franchissable peuvent être très ponctuellement de l'ordre de 60%.

Un véhicule blindé militaire est généralement très lourd au regard de son volume, le rapport poids/puissance a pour ordre de grandeur 20cv/tonne alors que pour un véhicule de tourisme le rapport poids/puissance est de l'ordre de 65cv/tonne. Les puissances consommées pour le déplacement d'un véhicule blindé de combat d'infanterie (vbc) sont beaucoup plus élevées, et principalement induites aux faibles vitesses par la pente et la résistance au roulement. La résistance aérodynamique est presque négligeable (Fig.2a).

Comme l'indique clairement la figure 2, les paramètres prépondérants sont la résistance au roulement et la pente. La résistance au roulement varie d'un facteur dix en fonction de la nature du sol et des conditions climatiques. Les caractéristiques du sol peuvent varier sur un parcours selon que le véhicule alterne de la route, du chemin dur, de la terre meuble (sol élasto-plastique), voir du sable dur ou mou (sol granulaire). Il n'existe pas de théorie unifiée permettant de modéliser la résistance au roulement dans toutes les conditions de roulage. Il est très difficile de connaître avec précision les caractéristiques du sol en fonction du temps. Pour apporter une solution acceptable à la modélisation de la résistance au roulement, celle-ci sera modélisée par un coefficient constant sur tout le parcours, exprimé en N/kg. Pour tenir compte de ces conditions très variables du coefficient de roulement, les calculs seront réalisés en faisant varier cette résistance au roulement entre ses deux valeurs extrêmes.

2.3. Modèle des profils de missions

2.3.1. Introduction

Depuis 50 ans et la période de guerre froide le comité Finabel [20] a pour but de promouvoir l'interopérabilité et la coopération des composantes terrestres de ses membres en recherchant l'harmonisation des concepts, des doctrines et des procédures.

Des groupes de travail ont alors été créés sur des thématiques majeures. Dans le cadre de ces groupes de réflexion ont été érigés des standards d'emploi des matériels. C'est ainsi qu'ont été définis au plus « bas niveau » de l'utilisation des matériels des cycles d'emploi, dénommés « journées Finabel ».

Ces cycles définissaient pour des périodes de 3x24 heures de combats des chronologies d'enchaînement de phases d'utilisation comprenant elles-mêmes des successions de tâches, déplacements et actions élémentaires. Ces « journées » se limitaient à la description de phase de combats de haute intensité.

La création de ces cycles ou profils d'emploi s'est toujours basée sur des réflexions purement intellectuelles s'inspirant du retour d'expérience des opérationnels et des connaissances académiques acquises sur le sujet. Ces standards ont souvent

fait l'objet dans le cadre des programmes d'armement français, d'aménagements et modifications au grès de la connaissance des hommes qui en avaient la responsabilité. Le manque de confiance des ingénieurs envers de tels standards, souvent critiqués de ne représenter qu'une réalité de fonctionnement et intégrant certainement une grande part de subjectivité dans leur description, est à l'origine de la méthode présentée dans cet article. L'objectif est de proposer une méthode s'appuyant sur des scénarios réels issus de relevés lors d'exercices d'entraînement de haute intensité au Centre d'ENtraînement TActique au Combat (CENTAC). Une grande quantité de données ont été enregistrées et constitue la base de données à partir de laquelle les scénarios d'emploi seront générés.

A l'instar du secteur civil, la méthode choisie dans le prolongement des travaux de Gwenaëlle Souffran [18], est l'emploi d'une chaîne de Markov, permettant de générer une grande quantité de scénarios et ainsi dimensionner à partir d'un grand nombre de cas possibles les sources d'énergie.

2.3.2. Caractéristiques générales des profils de mission recueillis

Tableau 2 : caractéristiques générales des missions

Distances (km)	[24 à 55]
Durées (s)	[10700 à 47000]
Vitesses maximales (km/h)	[64 à 74.4]
Vitesses moyennes (km/h)	6.4 à 22.9]
Accélérations moyennes (m/s ²)	[-2.28 à 1.384]
Punts (%)	[-20.76 à 17.94]
Durées des arrêts (s)	[2 à 10500]
Nombre d'arrêts	[40 à 131]
Temps moyens des arrêts (s)	[74 à 335]
Consommation des équipements (kWh)	[5 à 31.42]
Consommation d'énergie pour le déplacement (kWh)	[70 à 254]

Calcul réalisé hors rendement de la chaîne de propulsion. Caractéristiques véhicule : $C_x = 0.8$; Maitre couple : 7 m^2 ; Masse véhicule : 57400 kg

Le tableau 2 présente l'évolution des principales caractéristiques des missions enregistrées. Le véhicule militaire est principalement utilisé en phases de combat ou en phases d'entraînement. Les vitesses moyennes d'évolution sont très faibles, les temps d'arrêts nombreux représentent environ 80% du temps de la mission. L'énergie utile au déplacement sur une mission peut aller de 70 à 254 kWh (calcul effectué pour un coefficient de résistance au roulement de 0.22N/kg). La quantité d'énergie consommée par les auxiliaires et équipements peut quant à elle évoluer de 5 kWh à 31 kWh. Les figures 3a, 3b, 3c représentent respectivement l'évolution de la vitesse, la pente et l'accélération sur la même mission.

L'énergie récupérable peut évoluer dans un rapport d'au moins 25 en fonction de la résistance au roulement (Fig. 4.(a)). Il peut représenter jusqu'à près de la moitié (Fig. 4.(b)) de l'énergie utile au déplacement. Elle se dégrade vite dès que la résistance au roulement augmente. La puissance utile au fonctionnement des équipements et auxiliaires sera estimée à

une valeur constante de 3 kW pendant les phases de déplacement tactique. Cette valeur est la moyenne déduite des mesures réalisées sur le réseau de bord du véhicule. Une phase de déplacement tactique comprend une alternance de phases de roulages et d'arrêts, phases pour lesquelles toutes les fonctions du véhicule restent activées.

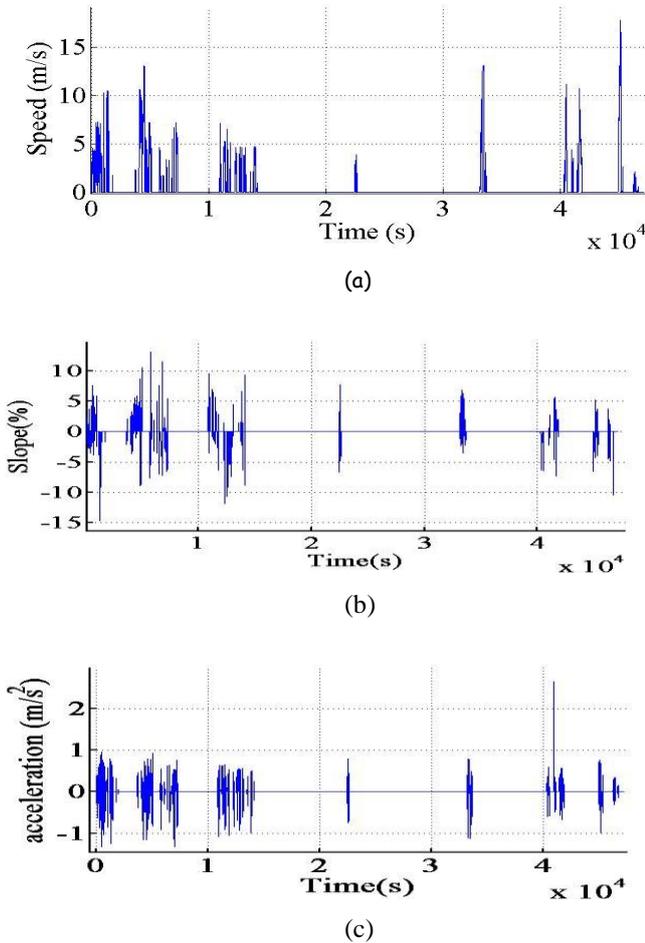


Fig. 3. Profils enregistrés d'une mission lors d'un exercice d'entraînement : (a) Vitesse. (b) Pente. (c) Accélération.

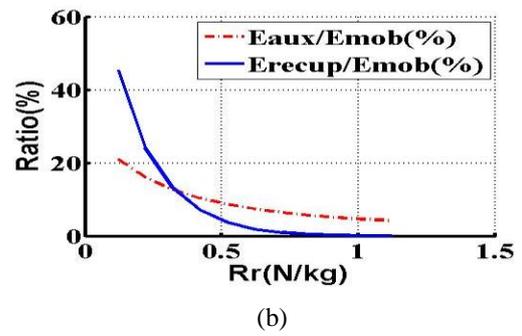
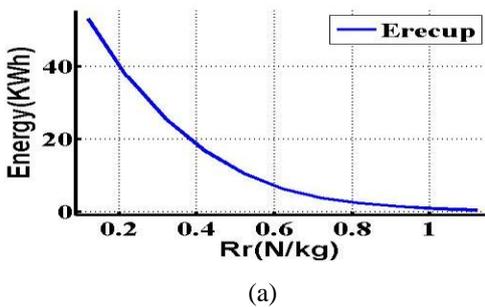


Fig. 4. (a) Energie récupérable (continue) (b) Energie récupérable en % de l'énergie utile au déplacement (continue). Energie consommée par les auxiliaires en % de l'énergie utile au déplacement (pointillée). Courbes tracées à partir des enregistrements d'une mission.

Caractéristiques du véhicule : $C_x = 0.8$; Maitre couple : 7 m^2 ; Masse : 57400 kg .

2.3.3. Rappel sur le processus de markov

Les profils de missions seront générés par une chaîne de Markov. Les missions enregistrées et présentées au 2.3.2 serviront de base de données au modèle stochastique. Il apparaît intéressant de rappeler les principes théoriques d'une chaîne de Markov. Il s'agit d'un processus stochastique discret qui détermine l'état futur d'une variable, uniquement à partir de l'état présent. L'état futur ne dépend pas de l'état passé. Une chaîne de Markov est modélisé par une matrice de transition carré $n \times n$, ou n représente le nombre d'états de la chaîne de Markov.

Chaque élément p_{ij} de la matrice représente la probabilité de transition de l'état S_i à l'instant t vers l'état S_j à $t+1$

$$M = [p_{ij}]_{(i,j=1,\dots,n)}$$

avec $p_{ij} = P[S(t+1) = S_j | S(t) = S_i]$

En d'autres termes, chaque ligne i de la matrice M représente la fonction de distribution de probabilité $f_i(x)$ de l'état futur $S_j (j=1, \dots, n)$ à partir de l'état présent S_i

2.3.4. Modèle de mission

Les états S_i de la chaîne de Markov seront définis par le trio de variables v, γ, α . La connaissance à chaque instant de ces trois variables permet de construire la matrice de transition M à partir des relevés effectués sur le véhicule lors des exercices d'entraînement (Fig.3.). Cette matrice permet ainsi de déterminer à partir du trio de variables $\{v_i, \gamma_i, \alpha_i\}$ à l'instant t le trio de variables $\{v_j, \gamma_j, \alpha_j\}$ à l'instant $t+1$. Ce traitement simultané des variables assurera la corrélation entr'elles, et préservera la cohérence des enchaînements d'états.

Un algorithme de simulation intégrant une méthode de Monte-Carlo permet de générer un nombre illimité de missions. A partir de ces missions on calcule l'énergie électrique consommée pour le déplacement du véhicule et le fonctionnement des auxiliaires. La connaissance des quantités d'énergie consommée permet ensuite de pré-dimensionner la capacité des dispositifs de stockage.

Il n'y a pas à ce jour de véhicules militaires équipés de propulsion hybride électrique en service au sein de l'armée Française. L'exigence de trois kilomètres du cahier des

charges est une valeur estimée de l'expérience des opérationnels. Il en est de même de la vitesse maximale de 30 km/h. Les données enregistrées (Tab. 2 & Fig. 3) font apparaître des dépassements de cette vitesse sur les véhicules en service. Il est impossible d'isoler avec certitude de ces enregistrements, des phases tactiques en cohérence des besoins en furtivité acoustique. Afin de respecter l'exigence de 30 km/h du cahier des charges sur les bases de données missions, il a donc été nécessaire de poser une hypothèse de travail.

Ces missions ont été modifiées en écrétant les profils de vitesse à 30 km/h. Cette hypothèse de travail a été préférée à la suppression des parties de roulage supérieures à 30 km/h, car ce choix entrainerait des niveaux de pentes supérieurs aux niveaux maximaux enregistrés (discontinuité du profil géométrique). Par ailleurs il est pertinent de penser que lors des phases de roulage supérieures à 30 km/h, le véhicule chercherait pour assurer sa mission à se déplacer à cette vitesse maximale.

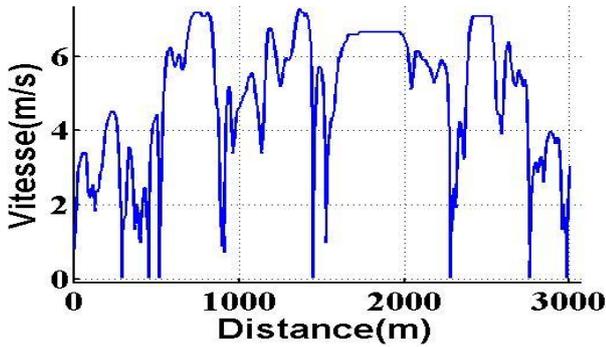


Fig.5. Profil de vitesse de déplacement simulé en fonction de la distance parcourue.

La figure 5 présente une phase simulée de déplacement furtif en fonction de la distance parcourue. Chaque phase est simulée pour une longueur de 3 kms correspondant à l'exigence du cahier des charges. Les profils de déplacements simulés sont ensuite directement exploités pour le dimensionnement de la capacité du dispositif de stockage.

2.3.5. Critères et méthode de dimensionnement

Le dimensionnement du stockage d'énergie est réalisé pour un roulage en mode furtif (tout électrique). On rappelle que le véhicule doit être capable de parcourir 3 kms à la vitesse maximale de 30km/h (Fig.5). Il doit être capable de redémarrer son moteur thermique à l'issue de ces trois kms. On peut ainsi déterminer la quantité d'énergie Q_D qui doit être stockée au départ de chaque cycle de déplacement furtif. Le critère suivant est donc utilisé pour dimensionner la capacité du dispositif de stockage de l'énergie :

$$Q_D = Q_{aux} - Q_{recup} + Q_{depl} + Q_S(6)$$

Q_{aux} : quantité d'énergie consommée par les auxiliaires pendant un cycle.

Q_{depl} : quantité d'énergie nécessaire au déplacement du véhicule sur un cycle.

Q_{recup} : quantité d'énergie récupérée sur un cycle.

Q_S : Seuil mini d'énergie stockée pour assurer le redémarrage à l'issue d'un cycle.

Q_D : quantité d'énergie stockée au départ du cycle.

Q_S est à déterminer en fonction des caractéristiques technologiques du dispositif de stockage, du moteur électrique de démarrage, de l'organe de démarrage, de la température ambiante du moteur thermique.

Comme nous l'avons vu au 2.1, l'écriture des équations de la puissance nécessite de distinguer pendant un cycle de déplacement furtif, les phases de déplacements avec consommation d'énergie {phases pf}, des phases de récupération d'énergie {phases pr}, des phases d'arrêts {phase pa} avec consommation d'énergie uniquement pour les auxiliaires. A partir des équations (1) (3) et (5) on peut calculer Q_D pour chaque phase.

On pose :

$$\eta_{bd} \times \eta_c \times \eta_{me} \times \eta_{ebv} \times \eta_{int} = \eta_{gd} = c_1$$

$$\eta_{bc} \times \eta_c \times \eta_{me} \times \eta_{ebv} \times \eta_{int} = \eta_{gc} = c_2$$

$$\eta_{aux} \times \eta_{bd} = c_3$$

$$\eta_{aux} \times \eta_{me} = c_4$$

$$\text{Phases pf} : Q_{D\{pf\}} = \frac{\int_0^T P_{aux}}{c_3} * dt + \frac{\int_0^T P_{roue}}{c_1} * dt(7)$$

$$\text{Phases pr} : Q_{D\{pr\}} = \frac{\int_0^T P_{aux}}{c_4} * dt - \frac{\int_0^T P_{roue}}{c_2} * dt \quad (8)$$

$$\text{Phases pa} : Q_{D\{pa\}} = \frac{P_{aux}}{c_3} * Ta \quad (9)$$

$$Q_D = Q_{D\{pf\}} + Q_{D\{pr\}} + Q_{D\{pa\}} + Q_S \quad (10)$$

On supposera dans le présent article et à ce niveau d'avancement de présentation de la méthode de pré-dimensionnement, que le système de propulsion électrique est parfait, soit $c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = 1$. Les résultats proposés n'ont qu'une valeur démonstrative, ils doivent être corrigés des rendements.

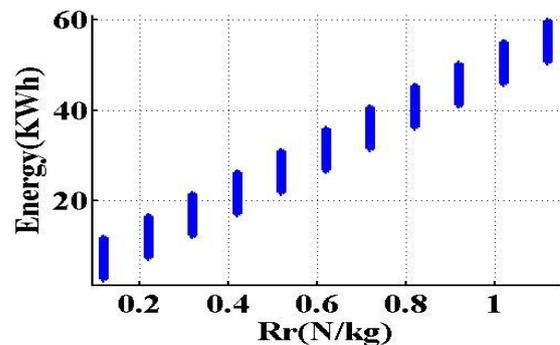


Fig.6. Puissance nette (hors rendements) de déplacement pour 1000 cycles tactiques en fonction de Rr coefficient de résistance au roulement.

A partir des équations (7) et (8) et (9) et de l'hypothèse de perfection du système, on calcule l'énergie nette à fournir pour assurer la mission, pour 1000 cycles de roulage en mode furtif (Fig.6.). Cette énergie est déterminée pour différentes valeurs de résistance au roulement R_r , évoluant de 0.12N/kg caractérisant le roulage sur bitume à 1.2 N/kg, caractérisant le roulage sur sable mou. Cette énergie croît linéairement en fonction de la résistance au roulement. Elle est de 5 à 6 fois supérieure pour un roulage sur du sable mou par rapport à un roulage sur du bitume. Cette figure met en évidence la très grande influence des caractéristiques du sol sur la quantité d'énergie à emmagasiner. La bonne connaissance du coefficient de résistance au roulement est nécessaire pour obtenir un dimensionnement significatif.

Le calcul sur 1000 cycles met en évidence une dispersion de l'ordre de 10 kWh sur le besoin en énergie. Cette dispersion est de moins en moins significative sur le dimensionnement au fur et à mesure que le coefficient de résistance au roulement augmente.

Le calcul réalisé met en évidence l'intérêt d'utiliser une approche statistique sur les cycles, pour pré-dimensionner, pour les sols relativement durs (bitume, terre compacte), soit des $R_r < 0.4$ N/kg. Cependant cet intérêt diminue pour des déplacements sur sols mous à très mous, soit des R_r proches de 1 N/kg.

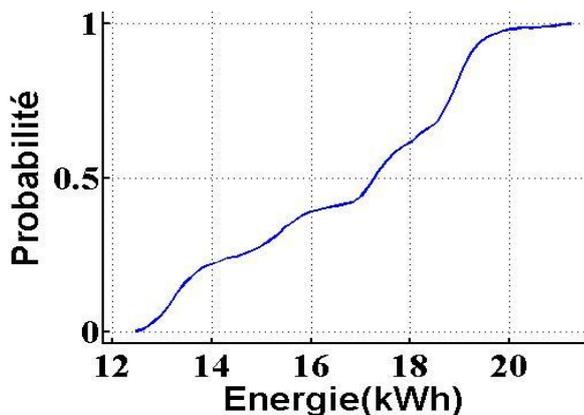


Fig.7. fonction de répartition de l'énergie nette (hors rendements) pour 1000 cycles tactiques. Calcul réalisé pour $R_r = 0,32$ N/kg.

Une seconde étape dans le calcul peut être envisagée. En effet la fonction de répartition de la quantité d'énergie peut être tracée (Fig.7.) Il est ainsi possible au concepteur de déterminer la capacité du dispositif de stockage, en fonction du niveau de probabilité choisi sur le respect des missions donc du cahier des charges (parcourir 3 kms). La fig.7 montre une évolution quasi linéaire de la fonction de répartition de 12.3 kWh à 19 kWh. Cette évolution linéaire est peu favorable car il est nécessaire de choisir une valeur de 19.5 kWh pour couvrir 95% des missions. Soit une valeur proche de la valeur maximale permettant de couvrir 100% des missions.

3. CONCLUSIONS

L'emploi d'une chaîne de Markov à partir du trio de variables $\{v_i, \gamma_i, \alpha_i\}$ s'avère adaptée pour la modélisation des profils d'emploi. Cette approche statistique est intéressante

pour le pré-dimensionnement et le roulage sur sol dur ou sur piste de terre compacte. Cet intérêt diminue si le véhicule roule sur des sols très mous. L'évolution de la fonction de répartition de la quantité d'énergie nécessaire à la réalisation de la mission n'est pas favorable à la minimisation de la capacité du dispositif de stockage. Les calculs ont été réalisés pour un système parfait, l'étape suivante de ce pré-dimensionnement consistera à intégrer dans le modèle énergétique l'évolution des rendements en fonction des points de fonctionnement du système.

Les calculs réalisés permettent d'ores et déjà de quantifier l'influence de la résistance au roulement sur la capacité de stockage à installer. Cette importante influence nécessite de la part du concepteur de disposer d'une très bonne connaissance des occurrences de roulage du matériel sur les différents types de sols.

Ultérieurement, le travail se poursuivra en tenant compte de déplacements en mode de propulsion hybride, ses incidences sur les consommations de carburant pendant les missions (hors déplacement en mode furtif) et la capacité du dispositif de stockage à installer.

4. REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier le partenariat du laboratoire IREENA de Saint-Nazaire dans la réalisation de ces travaux, en particulier dans le partage de son savoir-faire en matière d'approches stochastiques et la mise à disposition de méthodologies de calcul et outils de simulation spécifiques aux processus de Markov

5. REFERENCES

- [1] Ghassan Khalil "Challenges of Hybrid Electric Vehicles for Military Applications" 5th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC'09) September 7-11, 2009, Dearborn, MI 48128
- [2] Antonis I. Antoniou, Jonathan Komyathy, Justin Bench, and Ali Emadi, Senior Member, IEEE "Modeling and Simulation of Various Hybrid Electric Configurations of the High-Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle (HMMWV)" IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 56, NO. 2, MARCH 2007
- [3] H. Ed Bargar, Jingbo Li, Douglas J. Goering, and Jonah H. Lee "Modeling and Verification of Hybrid Electric HMMWV Performance" Industrial Electronics Society, 2003. IECON '03. The 29th Annual Conference of the IEEE 2-6 Nov. 2003 pages 939 - 944 vol.1
- [4] Margaret Ducusin, Student Member, IEEE, Sonya Gargies, Student Member, IEEE, Berhan Berhanu, and Chris Mi, Senior Member, IEEE "Modeling of a Series Hybrid Electric High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle" Vehicle Power and Propulsion, 2005 IEEE Conference 7-9 Sept. 2005, Page(s): 561 - 566
- [5] Scott Fish, Troy Savoie, and Harold Vanicek "Modeling Hybrid Electric HMMWV Power System Performance" IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 37, NO. 1, JANUARY 2001
- [6] Seta Bogosyan, Senior Member, IEEE, Metin Gokasan, Member, IEEE, and Douglas J. Goering "A Novel Model Validation and Estimation Approach for Hybrid Serial Electric Vehicles" IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 56, NO. 4, JULY 2007
- [7] Chirag Desai, Student Member, IEEE, and Sheldon S. Williamson, Member, IEEE "Optimal Design of a Parallel Hybrid Electric Vehicle using Multi-Objective Genetic Algorithms" Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. IEEE 7-10 Sept. 2009 pages 871 - 876

- [8] Dominik Buecherl, Student Member, IEEE, Igor Bolvashenkov, and Hans-Georg Herzog, Member, IEEE "Verification of the Optimum Hybridization Factor as Design Parameter of Hybrid Electric Vehicles" Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. IEEE 7-10 Sept. 2009 pages 847 - 851
- [9] Jiabin Wang, Senior Member, IEEE, Ben Taylor, Zhigang Sun, and David Howe "Experimental Characterization of a Supercapacitor-Based Electrical Torque-Boost System for Downsized ICE Vehicles" IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 56, NO. 6, NOVEMBER 2007
- [10] Lei Wang, Yong Zhang, Chengliang Yin, Minming Zhang "Design and Simulation for a Series-parallel Hybrid Electric City-bus" Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. IEEE 7-10 Sept. 2009 pages 1767 - 1772
- [11] G. Ripaccioli†, D. Bernardini†, S. Di Cairano‡, A. Bemporad† and I.V. Kolmanovskiy§ "A Stochastic Model Predictive Control Approach for Series Hybrid Electric Vehicle Power Management" 2010 American Control Conference Marriott Waterfront, Baltimore, MD, USA June 30-July 02, 2010
- [12] J. Solano-Martínez, L. Boulon, D. Hissel, Senior Member IEEE, M-C. Péra and M. Amiet "Energetic Macroscopic Representation of a Multiple Architecture Heavy Duty Hybrid Vehicle"
- [13] Loïc Boulon, Daniel Hissel, Senior Member, IEEE, Alain Bouscayrol, Member, IEEE, Olivier Pape, and Marie-Cécile Péra "Simulation Model of a Military HEV With a Highly Redundant Architecture"
- [14] Chan-Chiao Lin', Huei Pengl, and J.W. Grizzle' "A Stochastic Control Strategy for Hybrid Electric Vehicles" Proceeding of the 2004 American Control Conference Boston, Massachusetts June 30 -July 2,2004
- [15] Ilya Kolmanovskiy Irina Siverguina+ Bob Lygoe "Optimization of Powertrain Operating Policy for Feasibility Assessment and Calibration: Stochastic Dynamic Programming Approach" Proceedings of the American Control Conference Anchorage, AK May 8-10,2002
- [16] Lars Johannesson, Mattias Åsbogård, and Bo Egardt, Fellow, IEEE "Assessing the Potential of Predictive Control for Hybrid Vehicle Powertrains Using Stochastic Dynamic Programming" IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, VOL. 8, NO. 1, MARCH 2007
- [17] Gwenaëlle Souffran, Laurence Miègeville, Patrick Guérin "Simulation of Real-World Vehicle Missions Using a Stochastic Markov Model for Optimal Powertrain Sizing" IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 61, NO. 8, OCTOBER 2012
- [18] Gwenaëlle Souffran, "Dimensionnement de la chaîne de traction d'un véhicule électrique hybride base sur une modélisation stochastique de ses profils de mission" thèse de doctorat n° 503-164 de l'Université de Nantes, 5 juillet 2012.
- [19] Jérôme Delanoë, « Analyse prévisionnelle et stochastique des consommations électriques de charges multiples : application aux systèmes embarqués des véhicules de combat mobiles terrestres » thèse de doctorat n°503-019 de l'université de Nantes, 2008.
- [20] Revue « DOCTRINE » revues d'études générales n° 11 mars 2007 : page 20 : Finabel : au service de l'interopérabilité des armées de terre européennes depuis 50 ans
- [21] Jean-François REYNAUD, « Recherches d'optimums d'énergies pour charge/décharge d'une batterie: à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques» thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2011.
- [22] Loïc BOULON, « Modelisation multiphysique des elements de stockage et de conversion d'énergie pour les vehicules electriques hybrides approche systemique pour la gestion d'énergie» thèse de doctorat de l'université de Franche-Comté, 2009.