

Approche ontologique pour les batteries de seconde vie : une nouvelle méthode décisionnelle

Cyrine Soufi, Tedjani Mesbahi, Ali Ayadi, Ahmed Samet, Christophe Lallement

Université de Strasbourg, 67000, France Institut National des Sciences Appliquées (INSA Strasbourg), 67000, France

CNRS, ICube Laboratory UMR 7357, Strasbourg, 67000, France

RESUME – L'électrification rapide du secteur des transports a entraîné une croissance exponentielle de la demande en batteries lithium-ion, soulevant des enjeux critiques liés à l'approvisionnement en matériaux stratégiques et à l'empreinte environnementale associée à leur production. En réponse, l'Union européenne a instauré le passeport numérique pour batteries, outil réglementaire destiné à assurer la traçabilité, la durabilité et la circularité de ces dispositifs. Cet article propose une approche fondée sur une modélisation ontologique visant à améliorer la gestion de la fin de vie des batteries lithium-ion. L'approche intègre des métriques de performance, des données de vieillissement et la variabilité intercellules, afin de guider les processus décisionnels entre réaffectation en seconde vie et recyclage. L'architecture ontologique développée permet une interopérabilité accrue des données et constitue une brique essentielle pour la mise en œuvre opérationnelle du passeport numérique, ouvrant la voie à des stratégies de valorisation plus durables, traçables et conformes aux exigences réglementaires à venir.

Mots-clés – Batterie, Seconde Vie, Modèle Ontologique, Prise de Décision, Durabilité, Economie Circulaire.

1. INTRODUCTION

Dans un contexte géopolitique et environnemental dominé par les objectifs de neutralité carbone et l'intégration croissante des sources d'énergie renouvelables [1], l'électrification du secteur des transports a connu une accélération sans précédent, portée par des politiques publiques ambitieuses et des avancées technologiques majeures. Les véhicules électriques (VE) jouent un rôle central dans cette transition, en contribuant à la réduction des émissions urbaines et à la transformation des modèles énergétiques. Cette évolution a entraîné une augmentation exponentielle de la demande en batteries lithium-ion, qui alimentent non seulement les VE, mais aussi les systèmes de stockage d'énergie et les appareils électroniques portables [2, 3, 4]. Les projections récentes estiment que cette demande mondiale dépassera 4 900 GWh d'ici 2030, contre environ 800 GWh en 2022 [5, 6]. Cependant, cette croissance rapide soulève d'importants défis, notamment en matière d'approvisionnement en matières premières critiques telles que le lithium, le cobalt et le nickel [7], à la gestion des déchets, ainsi qu'à l'empreinte carbone considérable des processus d'extraction et de fabrication. En réponse à ces défis, l'Union européenne a introduit le passeport numérique pour batteries dans le cadre du Règlement (UE) 2023/1542, adopté le 12 juillet 2023 [8]. Ce dispositif réglementaire, applicable à partir de février 2027, vise à renforcer la traçabilité, la durabilité et la circularité des batteries mises sur le marché européen [9]. Il impose notamment l'intégration de données standardisées concernant la composition chimique, l'empreinte carbone, l'historique d'utilisation, la performance énergétique, l'origine des matériaux et le potentiel de réemploi ou de recyclage [10, 11, 12].

Dans ce contexte, la gestion optimisée de la fin de vie (EOL) des batteries lithium-ion devient un enjeu stratégique majeur. La littérature actuelle propose plusieurs approches décisionnelles pour orienter les batteries en fin de première vie vers des parcours de réutilisation, de reconfiguration ou de recyclage, en

fonction de leur état de santé (SOH), de leur énergie résiduelle, de leur résistance interne ou de leur capacité de puissance. En particulier, les batteries sont souvent retirées des véhicules électriques lorsque leur capacité chute à 70–80 % de leur valeur initiale [13, 14]. Outre la capacité résiduelle, la résistance interne, mesurée par des tests de courant impulsif ou par spectroscopie d'impédance électrochimique, constitue un indicateur clé de la dégradation de puissance [15, 16]. Les seuils de tension à vide (OCV) sont également utilisés pour effectuer un premier tri, éliminant les cellules les plus dégradées [17, 18]. L'historique d'utilisation en première vie, comprenant l'exposition thermique (climat tempéré vs. tropical), le kilométrage, les profils de cyclage et les profondeurs de décharge (DoD), permet une mise en correspondance des modules aux profils de vieillissement similaires, un élément crucial pour la stabilité des packs [17, 19]. Enfin, des méthodes expérimentales telles que l'étalonnage de capacité ou les tests de durée de vie utile restante (RUL) sous des conditions simulées viennent compléter l'évaluation de la réutilisabilité [20, 21].

Pour formaliser et simplifier cette analyse multi-paramétrique, Kostenko et al. ont proposé un indice de dégradation intégral (DI), qui regroupe dans un seul paramètre la profondeur de décharge, le taux de charge (C-rate), le niveau de charge (SoC) et la température [22]. Cet indice fournit une vision globale et dynamique de l'état de santé, tout en tenant compte des phénomènes de vieillissement calendaire et cyclique. Il constitue un outil particulièrement utile pour assurer la gestion optimale des batteries de seconde vie.

Parallèlement, Arrinda et al. ont proposé une méthode de classification fondée sur des seuils multidimensionnels, mettant en relation les paramètres techniques des batteries avec les exigences de différentes applications de seconde vie [23]. De leur côté, Hassini et al. ont développé une méthodologie expérimentale rigoureuse à plusieurs étapes comprenant une inspection visuelle, une évaluation fonctionnelle, et une sélection basée sur la compatibilité géométrique et des métriques seuils comme l'énergie résiduelle, la puissance de charge/décharge et le rendement énergétique [24].

C'est dans cette continuité que s'inscrit notre contribution, tout en s'en démarquant par l'originalité de son approche. Nous proposons une méthode décisionnelle sémantique basée sur les ontologies, exploitant la Semantic Web Rule Language (SWRL) [25] pour formaliser des règles expertes intégrant à la fois des critères techniques (SOH, puissance, variabilité intercellules), des exigences applicatives (compatibilité avec l'usage cible) et des contraintes réglementaires. Cette approche permet une représentation explicite, interopérable et automatisable des connaissances relatives aux batteries lithium-ion. En structurant ces connaissances dans une ontologie dédiée, nous ouvrons la voie à un système de raisonnement traçable et transparent, aligné sur les principes de durabilité et compatible avec le futur passeport numérique européen.

L'article est structuré comme suit : la section 2 présente le cadre conceptuel et les approches existantes en matière de décision en fin de vie. La section 3 décrit en détail la méthodolo-

gie ontologique adoptée. La section 4 expose l'implémentation concrète de l'ontologie et des règles SWRL à partir de données expérimentales. Enfin, la section 5 conclut l'étude et propose des perspectives de recherche futures pour étendre et renforcer ce cadre décisionnel innovant.

2. CONTEXTE

2.1. Prise de décision : recyclage vs réutilisation

Face à l'augmentation exponentielle de la demande en batteries lithium-ion, la gestion optimisée de leur fin de vie constitue désormais un enjeu majeur, tant sur le plan environnemental qu'économique. L'un des défis stratégiques réside dans l'évaluation de la filière la plus appropriée pour chaque batterie en fin de première vie : recyclage, réutilisation, ou réassemblage en nouveaux modules [26]. Bien que ces options soient complémentaires dans une logique d'économie circulaire, elles diffèrent par leur cadre opérationnel, leurs exigences techniques et leurs implications en matière de traçabilité et de durabilité.

- **Réutilisation** : Déploiement d'un module de batterie tel quel dans une application similaire ou différente de l'usage initial, sans modification structurelle. Par exemple, un pack de batterie issu d'un véhicule électrique peut être réutilisé dans un autre véhicule électrique ou un système de stockage stationnaire si ses performances (puissance, énergie) répondent aux exigences minimales.
- **Seconde vie** : Cas particulier de réutilisation où la batterie est affectée à une application moins exigeante que son usage initial en raison de dégradation de performance. Par exemple, une batterie de véhicule électrique présentant un état de santé (SOH) de 70% peut être réaffectée à des applications stationnaires à faibles exigences cycliques, telles que l'alimentation de systèmes d'éclairage public, le soutien réseau dans des micro-réseaux (microgrids), ou encore des usages logistiques tels que les chariots élévateurs, où les contraintes et de cyclage sont significativement réduites par rapport à l'usage initial
- **Réassemblage** : Processus de désassemblage d'un module en cellules individuelles, suivi d'une recombinaison sélective pour créer de nouveaux modules homogènes. Cette étape est critique lorsque la variabilité des cellules (écart-type du $\Delta SOH > 5\%$) compromet la fiabilité du module d'origine.

Cette décision dépend d'un ensemble de critères croisés : techniques, économiques et réglementaires, comme illustré dans la figure 1

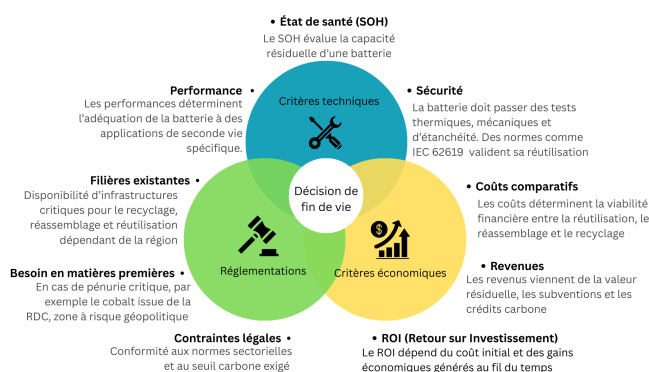


FIG. 1. Critères décisionnels pour la fin de vie des batteries : Performance technique, viabilité économique et conformité réglementaire

Parmi les critères techniques, on retrouve notamment :

- **L'état de santé (SOH)** : Si le SOH minimum d'un module tombe en dessous d'un seuil critique (par exemple, 40%), le recyclage est généralement recommandé pour récupérer les matériaux précieux [27].

- **Énergie et puissance** : Les batteries doivent répondre à des exigences spécifiques pour être réutilisées dans des applications de seconde vie, comme les systèmes de stockage d'énergie résidentiels. Si ces paramètres ne respectent pas les seuils requis, le recyclage devient la seule option [24].

- **Variabilité des cellules** : Une forte variabilité entre les cellules (par exemple, une déviation standard élevée du SOH) peut nécessiter une reconfiguration du module avant une éventuelle réutilisation [28].

Pour une évaluation globale, un indicateur comme le state of X (SOX) (une mesure synthétique des performances globales intégrant le SOH, le SOC, la résistance interne, la déviation standard des paramètres cellulaires, le coût et l'impact environnemental) peut être utilisé pour guider la prise de décision. Ce critère multicouche permet de pondérer les impératifs techniques, environnementaux et économiques, alignant ainsi la stratégie de fin de vie avec les principes de l'économie circulaire.

2.2. L'ontologie :

Dans des domaines complexes et en constante évolution comme celui des batteries, la gestion efficace de l'information constitue un enjeu central. Les ontologies offrent un cadre structuré pour organiser, standardiser et interpréter les connaissances tout au long du cycle de vie d'une batterie.

Une ontologie peut être définie comme une conceptualisation explicite et formelle d'un ensemble de concepts et de leurs relations, telle qu'acceptée par une communauté d'experts [29]. Cette définition, initialement proposée par Gruber et al. [30], a été affinée par Studer et al. [31], qui insistent sur la dimension communautaire et normalisée de la représentation. Une ontologie ne se limite donc pas à une nomenclature ou à une base de données, mais vise à fournir une représentation abstraite et exploitable d'un domaine, construite pour être comprise aussi bien par des humains que par des machines. Grâce à cette structuration, les ontologies facilitent la recherche d'information, la comparaison de systèmes, l'intégration de données hétérogènes, la comparaison entre systèmes et, surtout, la prise de décision éclairée. Appliquée au domaine de la gestion de la fin de vie des batteries, une ontologie permettrait d'unifier au sein d'un même cadre les critères techniques, économiques et réglementaires, assurant une meilleure interopérabilité entre les acteurs et outils impliqués.

2.3. Prise de décision basée sur les ontologies

L'émergence du paradigme de l'Industrie 4.0 a renforcé l'intérêt pour les systèmes de prise de décision fondés sur des ontologies, en raison de leur capacité à structurer formellement les connaissances métier et à favoriser une prise de décision plus précise, évolutive et adaptative dans des environnements industriels complexes et dynamiques. Ces approches ont été mises en œuvre dans divers domaines, tels que la planification énergétique urbaine, la gestion de la chaîne d'approvisionnement et la gestion énergétique, où elles facilitent l'interopérabilité des données et le raisonnement logique [32, 33]. Toutefois, bien que ces approches aient démontré leur pertinence, les applications ciblant la gestion de la fin de vie des batteries, et plus spécifiquement les stratégies de seconde vie, restent encore peu explorées. La spécificité des paramètres physiques (état de santé, hétérogénéité intercellulaire, métriques d'usage) et des exigences réglementaires (traçabilité, durabilité) appelle à la conception de modèles ontologiques dédiés, capables de guider la prise de décision de manière explicable, fiable et automatisable. C'est dans cette perspective que s'inscrit notre contribution.

3. MÉTHODOLOGIE

3.1. Conception de l'ontologie BattReLife

Comme présentée dans la Figure 2 l'ontologie BattReLife vise à modéliser les relations complexes entre les composants des batteries, leur comportement dynamique et les décisions prises en fin de vie. Elle repose sur une hiérarchie de classes articulée autour de la classe abstraite *BatteryComponent*, qui regroupe l'ensemble des propriétés descriptives communes aux modules et aux cellules, telles que : *hasSerialNumber*, *hasManufacturer*, *hasNominalCapacity*, *hasInternalResistance*, *hasMaxChargePower*, ou encore *hasRemainingEfficiency*.

Les classes *BatteryModule* et *BatteryCell* sont des sous-classes de *BatteryComponent*. La première contient des propriétés spécifiques liées à l'agrégation cellulaire et à l'évaluation de l'état de santé global, comme *hasNbCellsInSeries*, *hasAvgSOH*, *hasCellVariability* ou encore *hasEOLDecision*. Chaque *BatteryModule* est relié à ses cellules via la propriété d'objet *containsCell*. Quant à la classe *BatteryCell*, elle est caractérisée par la propriété *hasSOH*, qui mesure son état de santé individuel.

Le comportement dynamique est modélisé via la classe *ChargeDischargeCycles*, connectée à chaque cellule par la propriété *hasCycles*. Ces cycles sont organisés en lots à travers la classe *CycleBatch* (relation *hasCollection*), et chaque lot contient des données de séries temporelles instantiées dans *TimeSeriesData*, accessibles via la propriété *hasData*. Ces données capturent des mesures critiques telles que *hasVoltage*, *hasCurrent*, *hasTemperature* et *hasSoC*, toutes indexées par *hasTimeStamp*.

Les décisions de fin de vie sont encapsulées dans la classe énumérative *EOLDecision*, comprenant des options comme *Recycle*, *Reconfigure*, *ReuseEligible*, et *FirstLifeReuse*. Chaque module est relié à une instance d'*EOLDecision* via la propriété *hasEOLDecision*. Par ailleurs, les cas d'usage potentiels en seconde vie sont décrits dans la classe *SecondLifeApplication*, elle-même catégorisée en plusieurs types (*SolarStorageSystem*, *UPS*, *GridFrequencyRegulation*, *LightVehicle*) et caractérisée par des seuils minimaux de performance via des propriétés telles que *requiresMinEnergy*, *requireMinChargePower*, *requireMinDischargePower* et *requiresMinEfficiency*. Ces applications sont reliées aux décisions de fin de vie via la propriété *resultsIn*, indiquant le potentiel de réaffectation d'un module donné.

Pour assurer la cohérence des unités physiques (énergie, puissance, tension, etc.), l'ontologie a été alignée avec le référentiel QUDT (Quantities, Units, Dimensions and Data Types), largement utilisé dans les systèmes d'information scientifiques et industriels [34].

3.2. Raisonnement par règles SWRL

Afin d'automatiser le processus de décision concernant la fin de vie des batteries, nous avons défini un ensemble de règles SWRL reposant sur des paramètres techniques mesurés ou dérivés à partir des données opérationnelles comme le SOH, la variabilité des cellules et la résistance. Le SOH reflète la capacité résiduelle de la batterie par rapport à sa capacité nominale initiale. Un SOH élevé indique que la batterie reste performante, tandis qu'un SOH faible signale une dégradation avancée. La variabilité des cellules, quant à elle, fait référence aux écarts entre cellules d'un même module, notamment en termes de SOH ou de capacité. Une forte variabilité peut révéler un vieillissement non uniforme, entraînant des déséquilibres pendant les cycles de charge et de décharge, ce qui compromet la fiabilité de l'ensemble du module. Enfin, la résistance interne qui tend à augmenter avec l'âge et l'usage, affecte directement la capacité de la batterie à délivrer de la puissance, augmente les pertes énergétiques et favorise l'échauffement. Ces paramètres servent de base au raisonnement par règles pour orienter la décision vers l'un des trois choix principaux : réutilisation dans l'application d'origine, le recyclage, si les performances globales sont trop faibles, la réaffectation dans une application de seconde vie, lorsque les performances sont encore acceptables, ou

la reconfiguration, lorsque certaines cellules peuvent être réutilisées efficacement dans de nouveaux modules.

3.2.1. Décision Initiale : Recycler, Reconfigurer ou Réutiliser

Règle 1 : Recommandation pour le recyclage Si le SOH du module est inférieur à 40%, ou si sa résistance interne dépasse un seuil critique (par exemple 24 mΩ, en supposant une résistance typique de 1 mΩ par cellule, valeur pouvant varier selon la chimie, soit 12 mΩ pour un module de 12 cellules, une augmentation de 200% équivaut alors à 24 mΩ) [17], cela constitue un indicateur de vieillissement critique lié à une dégradation significative de la puissance. Dans ce cas, le recyclage du module est recommandé :

$$\text{BatteryModule}(?m) \wedge \text{hasSOH}(?mo, ?soh) \wedge \text{swrlb} : \text{lessThan}(?soh, 40) \rightarrow \text{hasEOLDecision}(?m, : \text{Recycle})$$
$$\text{BatteryModule}(?m) \wedge \text{hasResistance}(?m, ?R) \wedge \text{swrlb} : \text{greaterThan}(?R, 24) \rightarrow \text{hasEOLDecision}(?m, : \text{Recycle})$$

Règle 2 : Reconfigurer si la variabilité des cellules est trop élevée Une variabilité cellulaire élevée ($\Delta\text{SOH} > 5\%$) indique un déséquilibre nécessitant un démontage et une reconfiguration.

$$\text{BatteryModule}(?m) \wedge \text{hasCellVariability}(?m, ?var) \wedge \text{swrlb} : \text{greaterThan}(?var, 5) \rightarrow \text{hasEOLDecision}(?m, : \text{Reconfigure})$$

Règle 3 : Recommandation pour une application secondaire Les batteries avec un $\text{SOH} \geq 40\%$, une variabilité $\Delta\text{SOH} \leq 5\%$, et une résistance $\leq 24 \text{ m}\Omega$ sont éligibles à la réutilisation.

$$\text{BatteryModule}(?m) \wedge \text{hasSOH}(?m, ?soh) \wedge \text{swrlb} : \text{greaterThanOrEqual}(?soh, 40) \wedge \text{swrlb} : \text{lessThan}(?soh, 80) \wedge \text{hasResistance}(?m, ?R) \wedge \text{swrlb} : \text{lessThanOrEqual}(?R, 24) \wedge \text{hasCellVariability}(?m, ?var) \wedge \text{swrlb} : \text{lessThanOrEqual}(?var, 5) \rightarrow \text{hasEOLDecision}(?m, : \text{ReuseEligible})$$

Règle 4 : Réutilisation dans l'Application d'Origine Si le SOH du module est supérieur ou égal à 80%, recommander la réutilisation dans l'application d'origine :

$$\text{BatteryModule}(?m) \wedge \text{hasSOH}(?m, ?soh) \wedge \text{swrlb} : \text{greaterThanOrEqual}(?soh, 80) \rightarrow \text{hasEOLDecision}(?m, : \text{FirstLifeReuse})$$

3.2.2. Correspondance avec les applications de seconde vie

Une fois qu'un module de batterie est marqué comme *ReuseEligible*, c'est-à-dire jugé éligible à être réutilisé plutôt que recyclé ou reconfiguré, une étape supplémentaire d'évaluation est nécessaire pour déterminer à quelles applications de seconde vie il peut convenir. Cette évaluation repose sur une règle SWRL qui croise les caractéristiques techniques du module avec les exigences minimales de différentes applications. Cela inclut la comparaison entre l'énergie minimale requise *requiresMinEnergy* et l'énergie disponible du module *hasEnergy*, la puissance minimale requise *requiresMinPower* et la puissance maximale que peut fournir le module *hasPower*, ainsi que le rendement minimal requis *requiresMinEfficiency* et le rendement effectif du module *hasEfficiency*. Pour chaque application de seconde vie définie dans l'ontologie *SecondLifeApplication*, la règle vérifie que les valeurs du module sont supérieures ou égales aux seuils spécifiés. Si les trois conditions sont remplies, le module est alors déclaré comme étant *suitableFor* pour cette applica-

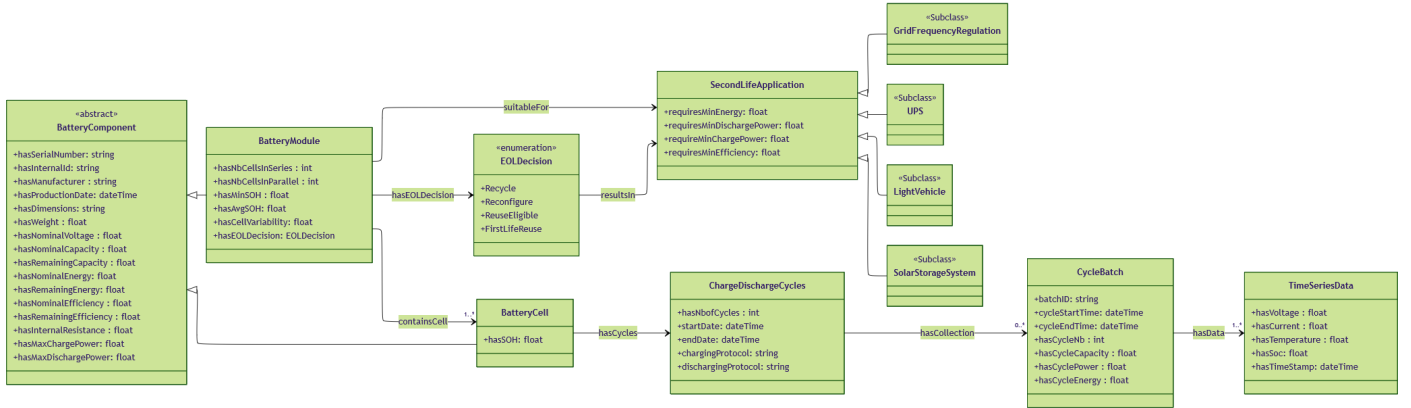


FIG. 2. Modèle conceptuel de BattReLife

tion, ce qui signifie qu'il est techniquement compatible avec ses exigences fonctionnelles.

```

BatteryModule(?m) ∧ hasEOLDecision(?m, :ReuseEligible) ∧ hasEnergy(?m, ?energy) ∧ hasChargingPower(?m, ?chPower) ∧ hasDischargingPower(?m, ?dischPower) ∧ hasEfficiency(?m, ?eff) ∧ SecondLifeApplication(?app) ∧ requiresMinEnergy(?app, ?minEnergy) ∧ requiresMinChargingPower(?app, ?minChPower) ∧ requireMinDischargingPower(?app, ?minDischPower) ∧ requiresMinEfficiency(?app, ?minEff) ∧ swrlb :greaterThanOrEqual(?energy, ?minEnergy) ∧ swrlb :greaterThanOrEqual(?chPower, ?minChPower) ∧ swrlb :greaterThanOrEqual(?dischPower, ?minDischPower) ∧ swrlb :greaterThanOrEqual(?eff, ?minEff) → suitableFor(?module, ?app).

```

4. IMPLÉMENTATION

Cette section détaille les aspects techniques de la mise en œuvre de l'ontologie et des règles SWRL, ainsi que l'intégration des données expérimentales pour valider la méthodologie proposée.

4.1. Outils et Environnement Technologique

L'ontologie a été développée à l'aide de l'outil Protégé (v5.6.1), un environnement open-source dédié à la modélisation et à la gestion des ontologies. Les règles SWRL ont été implémentées via le plugin SWRLTab, permettant d'encoder des raisonnements logiques au sein de la même ontologie. Le moteur d'inférence Pellet a été utilisé pour raisonner automatiquement sur les données et déduire des décisions de fin de vie cohérentes (recyclage, reconfiguration ou réutilisation).

Les données expérimentales, issues d'un module de batterie BMW i3 (configuration 12s1p, 94 Ah, 3,2 kWh), sont fournies par Hassini et al. [?]. Elles ont été prétraitées en Python à l'aide des bibliothèques Pandas et NumPy, afin d'extraire les métriques techniques nécessaires à l'inférence : SOH, résistance interne, dispersion intercellulaire et rendement énergétique. Ces données, illustrent la faisabilité de notre méthodologie pour évaluer la compatibilité des batteries vieillissantes avec des applications secondaires, tout en validant l'impact de la dispersion intercellulaire sur la durée de vie résiduelle.

4.2. Intégration des données expérimentales

Le module étudié est issu d'un véhicule BMW i3 fabriqué en avril 2017. Il est composé de 12 cellules prismatiques de type Samsung SDI, à chimie NMC111/graphite. Ses principales caractéristiques techniques sont les suivantes :

- **Tension nominale** : 44,2 V.

- **Courant de décharge maximal** : 94 A (1C).
 - **Performances énergétiques** : 114 Wh/kg, 174 Wh/L.
 - **Durée de vie estimé** : 11 ans à 25 °C.
 - **Dimensions et poids** : 410 × 300 × 150 mm, 28 kg.
- Les données, partagées par Hassini et al. [24], comprennent des profils de tension et de courant mesurés lors de 3 tests de caractérisation différents (Test de capacité, test d'impédance et test à faible courant). Ces paramètres ont permis de calculer :
- **La capacité résiduelle** : 91.8 Ah.
 - **La résistance interne moyenne** : 15.6 .
 - **La variabilité intercellulaire** : 2.8%.
 - **L'énergie résiduelle** : 3.6 kWh.
 - **La puissance de décharge résiduelle** : 38.6 kW.
 - **La puissance de charge résiduelle** : 28.1 kW.
 - **Le rendement** : 91%.

Ces résultats démontrent que le module conserve des capacités fonctionnelles élevées, le rendant éligible à des applications de seconde vie exigeantes telles que le stockage stationnaire résidentiel. Toutefois, ses dimensions et sa masse peuvent en limiter l'intégration dans des environnements compacts ou mobiles.

4.3. Application des règles SWRL

L'application des règles SWRL a été testée sur le module BMW i3 analysé précédemment. Le calcul actualisé de son état de santé donne un SOH de 97% (capacité résiduelle = 91,8 Ah / 94 Ah). Bien que ce niveau de SOH satisfasse formellement la condition de la Règle 4 (réutilisation dans l'application d'origine), nous supposons ici un scénario alternatif dans lequel cette règle est volontairement ignorée, afin d'illustrer la capacité du raisonnement à sélectionner des applications de seconde vie. L'enchaînement des règles est évalué comme suit :

1. Règle 1 : Recyclage

- **Condition** : SOH < 40% et R > 24 mΩ
- **Vérification** :
 - SOH = 97% (> 40%) → non déclenchée.
 - R = 15.6 mΩ (< 24 mΩ) → non déclenchée.
- **Décision** : Recyclage non recommandé.

2. Règle 2 : Reconfiguration

- **Condition** : variabilité des cellules > 5%
- **Vérification** : variabilité = 2.8% → non déclenchée.
- **Décision** : Aucune reconfiguration nécessaire.

3. Règle 3 : Réutilisation en seconde vie

- **Vérification** : le SOH = 97% qui est hors la plage de 40% à 80% mais dans ce cas on va assumer le contraire. La résistance, ainsi que la variabilité cellulaire est validé aussi.
- **Décision** : Le module est déclaré éligible à la réutilisation à vie déterminée (*ReuseEligible*).

Le module est donc évalué et comparé aux exigences techniques de plusieurs applications critiques, telles que définies dans le tableau 1. Chaque correspondance est établie à partir des performances mesurées du module : 3,1 kWh d'énergie disponible, 28,1 kW en puissance de charge, 38,6 kW en puissance de décharge, et un rendement global de 91 %.

TABEAU 1. Exigences minimales par type d'application

Application	Énergie Min	Puiss. Charge Min	Puiss. Décharge Min	Rendement Min
Stockage solaire	5 kWh	5 kW (0.2 C)	5 kW (0.2 C)	85%
ASI (Alimentation Sans Interruption)	2 kWh	10 kW (1 C)	10 kW (1 C)	90%
Régulation de fréquence réseau	100 kWh	100 kW (1 C)	100 kW (1 C)	92%
Véhicule léger	10 kWh	20 kW (2 C)	30 kW (3 C)	88%

Pour le stockage solaire résidentiel, le module présente un rendement conforme (91 % > 85%) et une puissance largement suffisante (décharge et charge > 5 kW). Toutefois, l'énergie disponible (3,1 kWh) reste inférieure à l'exigence minimale de 5 kWh. Ainsi, une seule unité est insuffisante. Une solution envisageable serait l'agrégation de deux modules, permettant d'atteindre 6,2 kWh, répondant alors au critère énergétique.

Concernant l'application ASI (Alimentation Sans Interruption), les performances du module dépassent toutes les exigences. L'énergie disponible est supérieure au minimum requis (3,1 kWh > 2 kWh), la puissance de décharge est largement suffisante (38,6 kW > 10 kW), et le rendement est également conforme (91 % > 90 %). Cette application apparaît donc parfaitement adaptée, avec en prime une marge de sécurité appréciable en termes de puissance.

En revanche, pour la régulation de fréquence réseau, le module est clairement sous-dimensionné. L'énergie (3,1 kWh) est très inférieure à la cible de 100 kWh, et la puissance de décharge est également insuffisante. De plus, le rendement mesuré (91 %) reste légèrement en deçà du seuil requis (92 %). Une mise en œuvre dans ce contexte nécessiterait l'agrégation d'environ 32 modules, accompagnée d'une optimisation du rendement, rendant l'option peu viable sans infrastructure dédiée.

L'évaluation pour une application de véhicule léger montre également des limitations. Bien que le rendement soit suffisant (91 % > 88 %), l'énergie embarquée (3,1 kWh) ne couvre pas le minimum requis de 10 kWh, et la puissance de charge (28,1 kW) reste inférieure à la cible de 30 kW. Ce module pourrait convenir à des micro-véhicules ou véhicules urbains très légers, mais demeure inadapté à des usages plus exigeants en autonomie et en recharge rapide.

Enfin, une nouvelle proposition d'usage a été formulée pour le stockage réseau haute performance à petite échelle, notamment pour des micro-réseaux ou des centres de données. Dans ce cas, les spécifications attendues (3 kWh, 30 kW, rendement 90 %) sont toutes satisfaites. Le module y trouve donc une application idéale, notamment en gestion de pics de demande.

4.4. Limites et perspectives d'optimisation

L'analyse révèle certaines limitations intrinsèques du module, notamment une capacité énergétique relativement faible, qui le rend inadapté, pris individuellement, aux applications grand public à forte demande énergétique. De plus, une asymétrie marquée entre la puissance de charge (28,1 kW) et de décharge (38,6 kW) peut restreindre certaines applications bidirectionnelles. Enfin, les règles de décision basées sur SWRL, bien qu'utiles pour formaliser des raisonnements techniques explicites, présentent une certaine rigidité. Elles ne tiennent pas compte de facteurs externes essentiels tels que les contraintes logistiques, les considérations économiques ou les contextes géographiques, pourtant déterminants dans les décisions de réaffectation ou de recyclage.

Pour dépasser ces limitations, plusieurs pistes d'optimisation peuvent être envisagées. Premièrement, l'introduction de règles SWRL contextuellement modulables permettrait d'ajuster dynamiquement les seuils techniques en fonction des cas d'usage.

Par exemple, des tolérances de $\pm 5\%$ sur la puissance admissible ou l'intégration de critères économiques tels que le coût du cycle de vie pourraient rendre le raisonnement plus souple et pertinent. Deuxièmement, la création d'une ontologie dédiée à l'agrégation intelligente des modules offrirait la possibilité de modéliser le regroupement de modules hétérogènes — en termes de capacité, de vieillissement ou de géométrie — pour répondre à des besoins spécifiques, notamment dans le cadre d'applications de stockage modulaire. Enfin, l'extension du passeport numérique à des indicateurs élargis de durabilité, tels que l'empreinte carbone, la réparabilité, ou encore le potentiel de réutilisation, permettrait de mieux orienter les modules vers des applications présentant un impact environnemental positif. Cela contribuerait à aligner les décisions techniques avec les objectifs de circularité et de responsabilité environnementale portés par la réglementation européenne.

5. CONCLUSIONS

Cette étude propose une approche innovante basée sur les ontologies pour optimiser la gestion de la fin de vie des batteries lithium-ion. En structurant les connaissances autour d'une ontologie sémantique dédiée et en utilisant des règles SWRL, la méthode permet de guider efficacement les décisions entre le recyclage, la reconfiguration et les applications de seconde vie. Les résultats démontrent l'intégration réussie de métriques de performance clés telles que l'état de santé (SOH), la puissance, la résistance interne et la capacité énergétique dans le processus décisionnel. Cette approche contribue ainsi à une valorisation plus fine, traçable et durable des batteries usagées.

Bien que la méthodologie ait été validée à partir de données réelles issues d'un pack de batterie automobile, plusieurs perspectives peuvent être envisagées. Une première consiste à enrichir le modèle avec des dimensions économiques et environnementales telles que le coût du cycle de vie, l'empreinte carbone ou encore les contraintes logistiques. Cela permettrait d'intégrer une logique multicritère (MCDA) pour refléter les arbitrages réels entre performances techniques et durabilité globale. Une autre piste d'évolution concerne la flexibilité des règles. Actuellement déterministes, les règles SWRL pourraient être étendues par des approches hybrides combinant logique floue et apprentissage automatique afin de mieux capter les variabilités contextuelles (usages, géographies, températures ambiantes, modèles économiques). Enfin, la modélisation du réassemblage de cellules issues de modules hétérogènes représente un levier prometteur pour prolonger la durée de vie utile des batteries en fin de première vie, tout en répondant à des exigences techniques et de sécurité spécifiques. L'ensemble de ces améliorations vise à renforcer la robustesse, l'extensibilité et l'applicabilité industrielle de l'approche proposée.

6. REMERCIEMENTS

Cette recherche a reçu un financement de l'Union européenne dans le cadre du programme Horizon Europe et du programme d'innovation sous la référence « GAP-101103667 »

7. RÉFÉRENCES

- [1] C. général au développement durable, "Commitments of the European Union," 2023. [Online]. Available : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat-2023/en/18-commitments-of-the-european-union.php>
- [2] "World Energy Outlook 2023 – Analysis," Oct. 2023. [Online]. Available : <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- [3] "Why renewables are the cornerstone of the energy transition," Apr. 2021. [Online]. Available : <https://www.weforum.org/stories/2021/04/why-renewables-are-the-cornerstone-of-the-energy-transition/>
- [4] I. E. A. (IEA), "World Energy Transitions Outlook 2023." [Online]. Available : <https://www.irena.org/Digital-Report/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>

- [5] "Battery Monitor 2023," 2023, last Modified : 2023-12-21T15 :44Z. [Online]. Available : <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Battery-Monitor-2023-An-assessment-of-the-current-and-future-battery-value.html>
- [6] "Lithium-ion battery demand forecast for 2030 | McKinsey," 2023. [Online]. Available : <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/battery-2030-resilient-sustainable-and-circular>
- [7] IEA, "Global Critical Minerals Outlook 2024," International Energy Agency, France, Tech. Rep., May 2024. [Online]. Available : <https://www.iea.org/topics/critical-minerals>
- [8] E. U. (EU), "Règlement (UE) 2023/1542 du Parlement européen et du Conseil du 12 juillet 2023 relatif aux batteries et aux déchets de batteries, modifiant la directive 2008/98/CE et le règlement (UE) 2019/1020, et abrogeant la directive 2006/66/CE (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE)," Jul. 2024, legislative Body : OP_DATPRO. [Online]. Available : <http://data.europa.eu/eli/reg/2023/1542/2024-07-18/ra>
- [9] C. Engel, "Circular economy : A digital EU product passport for batteries," Apr. 2024. [Online]. Available : <https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2024/april-2024/circular-economy-a-digital-eu-product-passport-for-batteries.html>
- [10] C. Soufi, T. Mesbahi, and A. Samet, "Digital Battery Passport as an Enabler of Environmental Impact Assessment in Electric Vehicle Applications," in *2023 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. Milan, Italy : IEEE, Oct. 2023, pp. 1–6. [Online]. Available : <https://ieeexplore.ieee.org/document/10403389/>
- [11] G. B. A. (GBA), "2022 Annual Impact Report," 2022. [Online]. Available : <https://www.globalbattery.org/media/publications/gba-2022-impact-report-master.pdf>
- [12] K. Berger, J.-P. Schöggel, and R. J. Baumgartner, "Digital battery passports to enable circular and sustainable value chains : Conceptualization and use cases," *Journal of Cleaner Production*, vol. 353, p. 131492, Jun. 2022. [Online]. Available : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622011131>
- [13] E. Martinez-Laserna, E. Sarasketa-Zabala, I. Villarreal Sarria, D.-I. Stroe, M. Swierczynski, A. Warnecke, J.-M. Timmermans, S. Goutam, N. Omar, and P. Rodriguez, "Technical Viability of Battery Second Life : A Study From the Ageing Perspective," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 3, pp. 2703–2713, May 2018. [Online]. Available : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8279474>
- [14] L. C. Casals, B. A. García, and L. V. Cremades, "Electric vehicle battery reuse : Preparing for a second life," *Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 10, no. 2, pp. 266–285, May 2017, number : 2. [Online]. Available : <https://www.jiem.org/index.php/jiem/article/view/2009>
- [15] J. Li, S. He, Q. Yang, Z. Wei, Y. Li, and H. He, "A Comprehensive Review of Second Life Batteries Toward Sustainable Mechanisms : Potential, Challenges, and Future Prospects," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 9, no. 4, pp. 4824–4845, Dec. 2023. [Online]. Available : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9950457>
- [16] A. N. Patel, L. Lander, J. Ahuja, J. Bulman, J. K. H. Lum, J. O. D. Pople, A. Hales, Y. Patel, and J. S. Edge, "Lithium-ion battery second life : pathways, challenges and outlook," *Front. Chem.*, vol. 12, Apr. 2024, publisher : Frontiers. [Online]. Available : <https://www.frontiersin.org/journals/chemistry/articles/10.3389/fchem.2024.1358417/full>
- [17] M. H. S. M. Haram, J. W. Lee, G. Ramasamy, E. E. Ngu, S. P. Thiagarajah, and Y. H. Lee, "Feasibility of utilising second life EV batteries : Applications, lifespan, economics, environmental impact, assessment, and challenges," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 60, no. 5, pp. 4517–4536, Oct. 2021. [Online]. Available : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016821001757>
- [18] J. Dulout and L. F. L. Villa, "Working towards greener golf carts – A study on the second life of lead-acid batteries," in *2019 Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, May 2019, pp. 1–5. [Online]. Available : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8813658>
- [19] B. Gohla-Neudecker, M. Bowler, and S. Mohr, "Battery 2nd life : Leveraging the sustainability potential of EVs and renewable energy grid integration," in *2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, Jun. 2015, pp. 311–318. [Online]. Available : <https://ieeexplore.ieee.org/document/7177641>
- [20] D. Strickland, L. Chittock, D. A. Stone, M. P. Foster, and B. Price, "Estimation of Transportation Battery Second Life for Use in Electricity Grid Systems," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 3, pp. 795–803, Jul. 2014. [Online]. Available : <https://ieeexplore.ieee.org/document/6762912>
- [21] L. C. Casals, B. Amante García, and C. Canal, "Second life batteries lifespan : Rest of useful life and environmental analysis," *Journal of Environmental Management*, vol. 232, pp. 354–363, Feb. 2019. [Online]. Available : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479718313124>
- [22] G. Kostenko, "ACCOUNTING CALENDAR AND CYCLIC AGEING FACTORS IN DIAGNOSTIC AND PROGNOSTIC MODELS OF SECOND-LIFE EV BATTERIES APPLICATION IN ENERGY STORAGE SYSTEMS," *System Research in Energy*, no. 3 (79), pp. 21–34, Jul. 2024, number : 3 (79). [Online]. Available : <https://systemre.org/index.php/journal/article/view/856>
- [23] M. Arrinda, M. Oyarbide, H. Macicior, E. Muxika, H. Popp, M. Jahn, B. Ganey, and I. Cendoya, "Application Dependent End-of-Life Threshold Definition Methodology for Batteries in Electric Vehicles," *Batteries*, vol. 7, no. 1, p. 12, Mar. 2021, number : 1 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute. [Online]. Available : <https://www.mdpi.com/2313-0105/7/1/12>
- [24] M. Hassini, E. Redondo-Iglesias, and P. Venet, "Battery Passports for Second-Life Batteries : An Experimental Assessment of Suitability for Mobile Applications," *Batteries*, vol. 10, no. 5, p. 153, May 2024, number : 5 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute. [Online]. Available : <https://www.mdpi.com/2313-0105/10/5/153>
- [25] Horrocks, Ian, Patel-Schneider, P. F. Boley, Harold, S. Tabet, Said, Grossof, B. Grossof, M. Dean, and Mike, "SWRL : A Semantic Web rule language combining OWL and RuleML," *W3C Subm*, vol. 21, Jan. 2004.
- [26] M. F. Börner, M. H. Friege, B. Späth, K. Spütz, H. H. Heimes, D. U. Sauer, and W. Li, "Challenges of second-life concepts for retired electric vehicle batteries," *Cell Reports Physical Science*, vol. 3, no. 10, p. 101095, Oct. 2022. [Online]. Available : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666386422003976>
- [27] S. Lieskoski, J. Tuuf, and M. Björklund-Sänkiahio, "Techno-Economic Analysis of the Business Potential of Second-Life Batteries in Ostrobothnia, Finland," *Batteries*, vol. 10, no. 1, p. 36, Jan. 2024, number : 1 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute. [Online]. Available : <https://www.mdpi.com/2313-0105/10/1/36>
- [28] M. Hassini, P. Seger, E. Redondo-Iglesias, S. Pelissier, and P. Venet, "Capacity Dispersion and Impact of Outliers in a Second Life Battery," *IEEE*, Oct. 2023, p. 1. [Online]. Available : <https://hal.science/hal-04177094>
- [29] T. R. Gruber, "Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing?" *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 43, no. 5, pp. 907–928, Nov. 1995. [Online]. Available : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1071581985710816>
- [30] —, "A translation approach to portable ontology specifications," *Knowledge Acquisition*, vol. 5, no. 2, pp. 199–220, Jun. 1993. [Online]. Available : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1042814383710083>
- [31] R. Studer, V. R. Benjamins, and D. Fensel, "Knowledge engineering : principles and methods. Data Knowl Eng 25(1-2) :161-197," *Data & Knowledge Engineering*, vol. 25, pp. 161–197, Mar. 1998.
- [32] N. Ouhajjou, "Ontology based decision support in urban energy planning," Thesis, Technische Universität Wien, Dec. 2016, accepted : 2020-06-28T01 :44 :13Z. [Online]. Available : <https://repositum.tuwien.at/handle/20.500.12708/2385>
- [33] N. Tomasevic, M. Batic, L. Blanes Restoy, M. Keane, and S. Vraneš, "Ontology-based facility data model for energy management," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 29, Sep. 2015.
- [34] R. H. Markus Lanz and J. Hodgson, "QUDT ontologies - quantities, units, dimensions and types," <https://qudt.org/>, 2023, accessed : 2025-05-30.