تحليل تكاليف دورة حياة بطاريات الليثيوم– ايون لتخزين الطاقة الكهروضوئية

Life cycle cost analysis of lithium-ion batteries for PV energy storage

صليحة بوالغبرة[*]، جامعة قسنطينة 2 (الجزائر)، saliha.boulghobra@univ-constantine2.dz

نهى بوطكوك، جامعة قسنطينة 2 (الجزائر)، nouha.boutekouk@univ-constantine2.dz

تاريخ الاستلام: 2026/07/04 تاريخ القبول: 2026/09/14 تاريخ النشر: 2026/09/30

ملخص:

تهدف الدراسة إلى تقييم نظم تخزين الطاقة الكهروضوئية PVE بالتركيز على تكنولوجيا الليثيوم– ايون في ظل تحول أسواق الطاقة العالمية نحو الطاقات المتجددة بإبراز دورها كأداة محورية لموازنة الإنتاج و الاستهلاك و تحقيق الكفاءة الاقتصادية و البيئية. اعتمد المنهج التحليلي المقارن للمفاضلة بين بطاريات الليثيوم ايون $LIBs$ و حمض الرصاص SLA، و ذلك بالاستناد إلى إطار تقييم دورة الحياة LCA كمدخل متكامل لتحليل التدفقات الطاقوية، الانبعاثات، و التكاليف عبر مراحل عمرها الاقتصادي.

تظهر الدراسة التباين الوظيفي و عدم النضج الكامل لتقنيات التخزين مع تحديات ضبط التكاليف الاستثمارية، إلا أن بطاريات الليثيوم تحسن كفاءة التخزين في أنظمة الطاقة المستقبلية و موائمة استغلال قيمتها المتبقية. يوصى باعتماد مناهج دورة الحياة في الدراسات الاقتصادية لأجل تبني رؤية استشرافية شاملة من " المهد إلى المهد " لدمج نظم تخزين الطاقة بفعالية وفق نموذج الاقتصاد الدائري المستدام.

كلمات مفتاحية: تخزين الطاقة الكهروضوئية، الليثيوم، تقييم دورة الحياة، تكاليف اقتصادية، آثار بيئية.

تصنيفات JEL : Q42، Q51، Q57.

Abstract:

This study focuses on evaluating photovoltaic energy storage systems and their role in achieving economic and environmental balance, in line with the global shift towards renewables, using a comparative analytical

[*] المؤلف المرسل.

approach. The study compares lithium-ion (LIBs) and lead-acid (SLA) batteries based on life cycle assessment (LCA) framework to measure energy flows, emissions and costs, despite initial capital challenges.

The results demonstrate the superiority of lithium-ion in enhancing the efficiency of future systems, particularly when recycled or reused. The study recommends integrating the (LCA) approach into economic research to adopt a cradle-to-cradle perspective that supports the circular economy.

Keywords: PVE storage; Lithium technology; LCA; Economic costs; Environmental impacts.

Jel Classification Codes: Q42, Q51, Q57.

1. مقدمة

يشهد الاقتصاد العالمي تطورات كبيرة في مجال إنتاج و استهلاك الطاقة في العقود الأخيرة في ظل استمرار هيمنة استخدام مصادر الوقود الأحفوري التي تتميز بالمحدودية، القابلية للنضوب و الإضرار بالبيئة، و هذا أمام التوجه نحو مصادر أكثر استدامة كالطاقة المتجددة و الذي تفرضه ظروف المنافسة في الأسواق و الحفاظ على متطلبات الاستقرار و النمو الاقتصادي. تعمل الأبحاث و الدراسات العلمية المتخصصة على تحليل البيانات الاقتصادية بهدف تطوير التطبيقات الصناعية الخاصة بالطاقات و الموارد المتجددة لتدعم تصميم و تحسين أداء إنتاج و تخزين الطاقة، لاستغلالها في تغطية الطلب العالمي دون إغفال المتطلبات البيئية، و نتيجة لذلك توسعت تطبيقات أنظمة تخزين الطاقة الشمسية كأحد الركائز الاقتصادية لدعم الانتقال الطاقوي الحالي، بفضل العامل التكنولوجي الذي يقود اغلب الابتكارات في الأحجام، التقنيات، التكاليف، و التي تمثل تحديات مهمة للأعوان الاقتصاديين المتدخلين في أسواق الطاقة بغرض: الربحية، القيمة المضافة، التنافسية، تحسين الخدمات، التحكم في التكاليف، خاصة و أن تكلفة نظام التخزين لوحدها قد تفوق 40 بالمائة من تكلفة الاستثمار الإجمالي لأنظمة الطاقة.

تتمثل **إشكالية** الدراسة في: **ما هو دور مناهج و استخدامات دورة الحياة لنظم التخزين (بطاريات الليثيوم) في تحسين الكفاءة الاقتصادية و البيئية لمشاريع الاستثمار في مجال تخزين الطاقة الشمسية الكهروضوئية ؟** و لمعالجة الإشكالية تحاول الدراسة الإجابة عن التساؤلات التالية:

- ما هي أهمية تقييم و قياس الآثار البيئية في تحليل تكاليف نظم تخزين الطاقة الكهروضوئية؟
- ما دور تكنولوجيا بطاريات الليثيوم في الطاقة في تكاليفها الاقتصادية و خفض الفاقد منها؟
- كيف يمكن لدراسات دورة الحياة أن تحسن جودة نظم تخزين الطاقة الكهروضوئية بتامين طاقة منخفضة الكربون و تكاليف اقتصادية مقبولة، و من ثم ترقية جدوى الاستثمار في مجال الطاقات المتجددة؟

و لمعالجة الإشكالية و التساؤلات المذكورة ، تسعى الدراسة إلى اختبار الفرضيات التالية:

- دورة الحياة هو مسعى متكامل لتحليل التكاليف الاقتصادية و البيئية لنظام التخزين بالليثيوم.
- يؤدي قياس و تقييم التدفقات الاقتصادية و البيئية دورا محوريا في دراسات دورة الحياة.
- دراسة دورة الحياة لأنظمة التخزين تساهم مباشرة في تحسين أداء و فعالية الأنظمة الكهروضوئية.

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل و تقييم نظم تخزين الطاقة الكهروضوئية، بالتركيز على بطاريات الليثيوم و دورة حياتها، على اعتبارها التكنولوجيا الأكثر استخداما و فعالية، و لإبراز مزاياها تمت مقارنتها ببطاريات حمض الرصاص حيث شملت المقارنة المؤشرات الاقتصادية و البيئية المتعلقة بدورة الحياة لكل منهما ، و هذا لبيان دورها في دعم شبكات تخزين الطاقة الكهروضوئية و استدامتها.

2. أهمية و تطبيقات الطاقة الشمسية

تحتل الطاقة الشمسية أهمية كبرى في الاقتصاديات الحديثة، فهي بمثابة الوقود الرئيسي المحرك للحياة الاقتصادية. إذ تستخدم في الجوانب الخدماتية و الحضرية ضمن مظاهر تغطية الاستهلاك الكهربائي المنزلي و المؤسساتي كالإنارة و التدفئة و التكييف و التسخين في المناطق المنعزلة عن الشبكة العمومية، ما من شأنه الإسهام إلى حد بعيد في تعزيز شبكة الكهرباء اللامركزية بكفاءة. (IRENA, October 2017)

و تستخدم الطاقة الشمسية على مستوى الإنتاج و إعادة الإنتاج كأهم حلقة في النشاط الاقتصادي، لتشغيل المحولات الصناعية الكبرى و الأنظمة التقنية الكبيرة لخطوط الإنتاج، الآلات، أنظمة

التبريد و التسخين، مع تحسين الجودة و خفض تكاليف التشغيل من حيث ترشيد الاستهلاك و خفض الفاقد في القطاعات الإستراتيجية ذات الطاقة المدمجة الرمادية العالية (مكثفة الاستهلاك من الطاقة) كصناعة الاسمنت و التعدين،كما تستخدم في المجال الزراعي لتشغيل مضخات الري بدل الاعتماد على الديزل، و للتدفئة في البيوت البلاستيكية و التحكم في شروطها (الإضاءة، الحرارة و الرطوبة)، ليمتد نطاقها في استحداث وظائف جديدة كدمج الطاقة الشمسية في الزراعة بما يسمى مزارع كهروضوئية ذكية.

أما استغلال الطاقة الشمسية على مستوى الاقتصاد القومي في الشبكات الكهربائية الوطنية يقلص الاعتماد على الوقود الأحفوري، و يخفض تكاليف الاستيراد لدعم ميزان المدفوعات مع توفير عمالة جديدة في قطاعات التركيب و الصيانة و التصنيع المحلي. و ينتج عن استغلال الطاقة الشمسية نوعان من الطاقة: حرارية و كهربائية (ADEME, 2012)، الأولى طاقة حرارية / مركزة CSP (GUNT Hamburg, 2024, p. 15)، أما الثانية فهي طاقة كهروضوئية PVE.

3. النظام الكهروضوئي PV

هو منظومة متكاملة صممت لإنتاج الطاقة من ضوء الشمس وفقا لمبدأ التحويل الكهروضوئي، و يتكون من أنظمة فرعية و يعتبر نظام التخزين واحدا منها. (ADEME, septembre 2019)

4. أهمية نظام التخزين و دمج الطاقات المتجددة

التخزين هو مجمل الأجهزة و العمليات التي تسمح بتخزين و استرجاع تدفق الطاقة بإنشاء وحدة وسيطة تربط بين المنتج (النظام الكهروضوئي) و المستهلك لها، فهي حلقة الوصل بين إنتاج الطاقة وتوزيعها و استغلالها بكفاءة (ابو الخير و دياب، 2014 – 2015، صفحة 23).

رغم أن الأنظمة الكهروضوئية تعمل بشكل فعال و واسع دون تخزين، إلا أن الاعتماد عليها محدود لارتباطه بالطبيعة المتغيرة وغير المنتظمة للإشعاع الشمسي على المدى القصير كالليل و النهار، أو الطويل كالشتاء و الصيف، إضافة إلى إمكانية قطع الكهرباء في أوقات ذروة الحمولة، و يبرز العجز في الإمداد خاصة في الأنظمة منفصلة عن الشبكة، ما يحتم تطبيق نظم كهروضوئية مع نظام تخزين جيد و مرن،

يسمح بإدارة تخزين الفائض خلال أوقات الذروة و استعادتها عند غياب الشمس لتغذية الاستهلاك كالإنارة وضخ المياه ... (ابو الخير و دياب، 2014 - 2015، صفحة 24).

يقترح اقتصادياً على المدى البعيد استخدام الطاقة الكهروضوئية لإنتاج الهيدروجين ثم استخدامه في خلايا الوقود لإنتاج الكهرباء و غيرها. و نظرا لتقلب طبيعة الطاقات المتجددة، يتم دمجها أحيانا بالاعتماد على أكثر من مصدر (مثلا شمس– غاز طبيعي أو شمس- رياح)، كما هو الحال في المحطات الهجينة، حيث تستخدم الطاقات المتجددة في المحطات التقليدية بشكل امن و مستقر، و تتجسد فكرة الدمج جيدا في الشبكات الكهربائية الحكومية أين يرتبط التخزين بمتطلبات تامين الطاقة على المستوى القومي.

5. تقييم أنظمة تخزين الطاقة الشمسية

إن الطاقة الكهربائية صعبة التخزين مقارنة بالأشكال الأخرى لذا تحول إلى أشكال يسهل تخزينها (ابو الخير و دياب، 2014 - 2015، صفحة 14). تختلف نظم التخزين حسب طبيعة الاستخدام، المادة الوسيطة، المدة الزمنية، التكلفة الاقتصادية، و نضج التقنية كعامل أساسي لتحديد النظام المناسب، و حجم النظام إلى مركزي و لامركزي (ADEME, 2012)، إضافة إلى معيار الثبات/عدم القابلية للنقل و نميز بين أنظمة ثابتة و أنظمة مدمجة أو محمولة (R . Kabouche, 2012, pp. 118 - 119) . النضج التكنولوجي بأنه بلوغ مرحلة الاستقرار الاقتصادي الفني و التسويقي الكامل بعد تجاوز مرحلة التطوير و الدراسات التجريبية النموذجية، و يقاس بمؤشر TRL 9 في مجال الطاقة و يعبر عن مستوى ريادية أو جاهزية التكنولوجيا. (Grosjean, 2012, p. 13).

إن التخزين الكهرومائي باستخدام تقنيات محطات ضخ الماء من السدود و التوربينات PHS يمثل ما نسبته 97 % من القدرة الاستيعابية العالمية المرتبطة بتخزين الكهرباء و الطاقة عموما و بقي يحتل الصدارة ليتراجع في السنوات الأخيرة إلى 60 – 70 % أمام تطور استخدام البطاريات في العقد الأخير. (IRENA, October 2017, p. 50). عموما اتسع نطاق أنظمة التخزين لارتباطها بالشبكات

الكهربائية لمنشات إنتاج الطاقات المتجددة، أما على المدى الطويل يؤثر في استخدام أنظمة التخزين عاملان : التكنولوجيا و البيئة الاقتصادية . (ADEME, 2012)

6. مكونات و خصائص البطاريات الشمسية

إن وظيفة البطارية في النظام الكهروضوئي هي تخزين الطاقة الكهربائية المنتجة بواسطة الخلايا الشمسية، لتكون مستودع الطاقة المنتجة خاصة في الأنظمة ذاتية الإنتاج و تتميز بالقابلية لإعادة الشحن على عكس الأعمدة الكهربائية/الخلايا الأولية، و يسمى هذا النوع بالبطاريات ذات التفريغ البطيء. (ابو الخير و دياب، 2014 - 2015، صفحة 23).

تتكون البطارية من قطبين أحدهما موجب و هو الكاثود و الآخر سالب و هو الآنود، يفصلهما عازل كهربائي مغمور في الإلكتروليت الذي يمثل الوسط الناقل للكهرباء. و تتميز البطاريات الشمسية بخصائص مشتركة نذكر أهمها و التي تخدم أهداف البحث: (كاميليا يوسف، 2019، صفحة 71).

1.6. السعة (Charge capacity)

كمية الطاقة الكلية التي يمكن للبطارية توفيرها في ظرف ساعة و تقاس بالآمبير/سا (Ah) ، و كلما كان زمن التفريغ أبطا كلما زادت السعة الفعلية لتقترب إلى السعة الاسمية. و يتحدد زمن التفريغ تبعا لمعامل Peukert حيث يبلغ 1,05 في الليثيوم، و بين [1,1 - 1,3] في الرصاص.

2.6. القدرة Energy capacity

تمثل معدل الطاقة المخزنة في البطارية بوحدة قياس هي KW/h ، أي بقدرة 1000 واط في ساعة واحدة.

3.6. المقاومة الداخلية internal resistance

تعكس بصفة غير مباشرة الكفاءة الاقتصادية و التقنية للبطارية، و تتغير المقاومة الداخلية تبعا لعدة عوامل مثل : طريقة الشحن و التفريغ و درجة الحرارة و حالة البطارية الآمنة و مستوى شحنها كما يمكن أن تعكس العمر التشغيلي ...

4.6. الكفاءة الطاقوية Efficiency round-trip

هي نسبة مدخلات الطاقة إلى المخرجات منها، مؤشرا في غاية الأهمية لأنه يدخل في تقييم فعالية التخزين مع الأخذ في الحسبان الفاقد ،كما أن انخفاض كفاءة الدورة الكاملة يفسر غالبا بوجود فاقد او هدر في البطارية أو المراكم.

5.6. الطاقة الكتلية Specific energy

هي كمية الطاقة التي يخزنها الكيلوغرام الواحد من وزن البطارية ، و تحسب بقسمة الطاقة الإجمالية على وزن البطارية، فكلما كانت الطاقة الكتلية كبيرة كلما خف وزن البطارية و تقاس ب (Wh/Kg).

6.6. التفريغ الذاتي Self–discharge

هو نسبة الفاقد من شحنة البطارية دون استعمالها ، و تكون هذه أعلى في الرصاص من الليثيوم و ترتفع هذه النسبة عموما بسبب درجات الحرارة المرتفعة.

7.6. عمق التفريغ Depth Of Discharge

هو نسبة الطاقة التي نفذت من البطارية بعد الشحن الكامل، يعتمد في تقدير إهتلاك البطارية و تحديد عدد مرات الاستبدال. و للحفاظ على كفاءة تشغيلية جيدة، لا بد من تجنب الشحن الزائد أو الشحن بجهد مرتفع ، كما يتعين تحديد مجال امن للبطارية و هو SOC_t بتجنب التفريغ الكامل.

8.6. دورات الشحن و التفريغ

من محددات العمر الإنتاجي للبطارية و يمثل عدد المرات التي تتم فيها إتمام دورة كاملة من الشحن/ التفريغ عند عمق تفريغ معين، مثلا بطارية الليثيوم يتراوح عدد دوراتها بين 2000–5000 دورة عند عمق تفريغ DOD يساوي 80 %.

9.6. العمر أو فترة الحياة

يختلف العمر الاقتصادي الذي يشمل جميع مراحل دورة الحياة أي من المهد إلى اللحد (cradle to grave)، عن العمر الإنتاجي (التشغيلي) الذي يعبر فقط عن الفترة الفعلية الذي تكون فيه البطارية تؤدي وظيفة التخزين في إطار مرحلة الاستغلال دون الأخذ في الحسبان مرحلة نهاية دورة الحياة و التدوير و المعالجة... . و كلا التصنيفين يمكن أن يكون افتراضيا أو فعليا ، فلا يتحدد العمر الحقيقي إلا بعد

انقضاء دورة الحياة الفعلية للبطارية، أما الافتراضي فيتحدد عادة في مرحلة التصميم و التطوير حيث توضع المواصفات الاقتصادية و التقنية الخاصة بصنع البطارية .

7. أنواع البطاريات في الأنظمة الشمسية و مجالات استخدامها

تحتاج معظم الأنظمة الكهروضوئية إلى أنظمة تخزين مناسبة لتغذية الأحمال المطلوبة عندما لا تتوفر أشعة الشمس (وجود غيوم، فترة الليل ...). و تتوفر العديد منها إلا أن البطاريات كأحد طرق التخزين الكيميائي، تعد الأفضل من الناحية الاقتصادية و العملية حيث تتمتع بمواصفات خاصة أهمها الكفاءة العالية للشحن، قلة الفاقد الكهربائي، قلة متطلبات الصيانة و طول العمر الإنتاجي، وأخيرًا التكيف مع الظروف المناخية المحيطة. (ابو الخير و دياب، 2014 - 2015، صفحة 14).

تصنف البطاريات إلى نوعين رئيسين: نوع غير قابل للشحن، و آخر قابل لإعادة الشحن كبطارية حمض الرصاص المستخدمة في السيارات و وسائط النقل الأخرى (حسنين، 1995، صفحة 40) ، أما في الأنظمة الشمسية تستخدم أنواع عديدة تصنف حسب المادة الكيميائية الأساسية إلى: بطاريات حمض الرصاص، النيكل المعدني، الليثيوم، النيكل الهيدروجيني ،كلوريد الصوديوم ، النيكل–كادميوم ...

أما بالنظر إلى حجم النظام فنميز بطاريات تقليدية استخدامها محدود و متوسط، و بطاريات مخصصة للأحمال الكهربائية الكبيرة و هي بمثابة خزانات ضمن محطات خاصة و تتميز بتكلفتها الاقتصادية المرتفعة و مردوديتها العالية، مثل مراكمات أكسدة – اختزال Redox flow . و عموما تصنف البطاريات حسب عدة معايير أهمها: القابلية للشحن، مجال الاستخدام، عمر البطارية، كثافة الطاقة، التكنولوجيا، النضج التكنولوجي، التكلفة المالية. (R . Kabouche, 2012, p. 119).

1.7. بطارية حمض الرصاص (SLA)

اخترعت سنه 1859 ثم طورت كبطارية محكمة الإغلاق في منتصف 1970 (ابو الخير و دياب، 2014 - 2015، صفحة 93)، و تستخدم في الأنظمة الكهروضوئية، و أجهزة UPS التي توفر طاقة احتياطية فورية حال انقطاع التيار الكهربائي، و ظلت بطاريات الرصاص الأقدم و الأكثر استخداما لتكلفتها المنخفضة قبل أن تحتل بطاريات الليثيوم و تقنيات أخرى مثل الهيدروجين كحامل للطاقة الصدارة

في أنظمة تخزين الطاقة. و أهم أنواع بطاريات حمض الرصاص محكمة الإغلاق هي: AGM و GEL التي تعد أكثر توفيرا و حفاظا على استقرار الطاقة المسترجعة لتحملها التفريغ العميق كما أنها تناسب التخزين للفترات الزمنية الطويلة . (حسنين، 1995).

2.7. بطارية الليثيوم (Li-ion)

يستخدم الليثيوم على نطاق واسع في المركبات الكهربائية EVs، الصناعات المعدنية و الالكترونية، المجالات الفضائية، تبريد المفاعلات النووية . إلا أن تطبيقاته الأساسية متجسدة في البطاريات الشمسية و الشبكات الكهربائية، و تم تطويرها في مطلع 1990، لتدمج في العديد من القطاعات الصناعية استجابة لطبيعة و جودة البطاريات المطلوبة في الأسواق، و يتوقع أن يتضاعف حجم هذه الصناعة أربعة مرات ما بين 2024 – 2035 (ابو الخير و دياب، 2014 - 2015).

تتمثل مزايا الليثيوم في القابلية العالية للتخزين و الاستيعاب بفضل كثافة الطاقة المرتفعة و سرعة الشحن، و انخفاض درجة الحرارة الناتجة عن التفاعلات الكيميائية للشحن و التفريغ في الظروف الطبيعية، علاوة على طول دورة الحياة الإنتاجية المفترضة. (كاميليا يوسف، 2019، صفحة 73) وتوضح المقارنة بين أنواع بطاريات الليثيوم ($C - LiFePO_4 . Li(NiCo)O_2 . LiMn_2O_4 . LiCoO_2$.) حسب مجموعة من المؤشرات (السلامة و الأثر البيئي ، العمر الافتراضي ، الطاقة الكتلية) أن أفضل نوع هو $LiFePO_4$ سواء من حيث التكلفة ، العمر الافتراضي أو حتى عامل الحساسية للحرارة و الذي يعتبر عاملا هاما في تحديد مردودية و كفاءة وظيفة البطارية. (Grosjean, 2012, p. 73).

8. تحليل التكاليف الاقتصادية و البيئية لدورة حياة بطاريات الليثيوم

1.8. مفهوم تحليل دورة الحياة

يعد من أهم الأساليب المستخدمة في تحديد الآثار الاقتصادية و البيئية للنشاط البشري، من خلال دراسة مراحل دورة حياة المنتج ابتداء من مرحلة الإعداد و التصميم و الإنشاء و وصولا إلى التخلص بعد نهاية عمره الافتراضي، إذ يساعد بصفة دقيقة على تصور المظاهر الممكنة التي يمكن أن تشكل الآثار في كل مرحلة. و يعتمد هذا الأسلوب على نماذج رياضية تسمح بتحويل جميع تدفقات

للمنتج باختلاف أنواعها بعد تحليلها و تقييمها إلى آثار دائمة ذات تكلفة اجتماعية مدروسة و ممنهجة، و تعاظمت أهمية تقييم الأثر البيئي منذ فترة ليست بالبعيدة كمدخل أساسي لتحديد تكاليف الاستثمار في مرحلة التصميم و التطوير، اقتناء المواد الأولية، مرحلة التصنيع و معالجة النواتج و هكذا ...

جدول 1 : استنباط الآثار البيئية من خلال دورة حياة منتج

مراحل دورة الحياة / المظهر / الأثر	التصميم و الإنشاء			الاستغلال /الإنتاج	نهاية العمر الإنتاجي
	المواد الأولية	**التصنيع/التحويل**	**التوزيع/النقل**	**الاستغلال/الصيانة**	**الرمي/التخلص**
المخلفات الهوائية	+	++	++		++
استهلاك المياه	+	++		+	
المياه الملوثة	+	++			
النفايات الصلبة	+	+	+	+	++
الطاقة الرمادية	+	+++	+	+	++
الوسط الطبيعي		+	+	+	+++
الصحة الإنسانية	+	+		++	
التكاليف المالية	++	++++	+	+	+++
بصمة الكربون		++++	+	+++	+++
إعادة التدوير		+			++++
السمية	+	++		++	+++

المصدر: من إعداد الباحث بالاعتماد على مراجع البحث

يوضح الجدول 1 كيفية استخلاص و دراسة المظاهر و الآثار البيئية عبر مختلف مراحل دورة حياة المنتج، و تتلخص أهمها في: تلوث المياه، أبخرة سامة، انبعاث الكربون، الصحة العامة ... و يتعين التمييز الدقيق بين المظهر البيئي Aspect و الأثر البيئي Impact و العلاقة السببية بينهما. مثلا يعد استهلاك الماء أو الكهرباء إجراءا عاديا في مرحلة الإنتاج لمنتج معين إذن فهو مظهرا بيئيا ينتج عنه آثار بيئية ملاحظة و هي مياه ملوثة ، كما أن مرحلة الاستغلال للمنتج ينتج عنها انبعاث غازات الدفيئة GHG

التي تسبب الاحتباس الحراري مثل: CO_2 ، و أخرى مضرة بالغلاف الجوي مثل: CFC11، HCFC، C_2H_4، méthane ، SO_2 ، H_2SO_2 ، هذه الانبعاثات تسبب تلوث الهواء، و هذا بغض النظر عما إذا يمكن التحكم بها أم لا.

2.8. دورة حياة بطارية الليثيوم

هي سلسلة المراحل التي تمر بها البطارية ابتداء من جمع المادة الأولية و التصنيع و مرورا بالاستغلال بما فيها الشحن و التفريغ إلى غاية نهاية دورة الحياة ثم الاستبدال، كما يلي:

1.2.8. تصنيع و إنتاج البطارية

يبدأ تصنيع بطاريات الليثيوم بتجميع المواد الخام الضرورية مثل الليثيوم، الكوبالت ، النيكل و الغرافيث ....و من ثم تعدينها و تصنيعها لإنتاج خلايا البطارية.

2.2.8. التشغيل و الاستغلال

تعد بمثابة مرحلة الإنتاجية بالنسبة للبطارية أين تجري عمليات الشحن و التفريغ مع أن العمر الإنتاجي للبطارية يتحدد بعدد دورات الشحن و التفريغ مع عوامل أخرى كدرجة الحرارة العالية و عمق التفريغ ، إلا إن تكرار العملية يؤدي حتما إلى تناقص أدائها الوظيفي مع مرور الوقت.

3.2.8. الاهتلاك و التدهور

مع تقدم العمر الإنتاجي للبطارية و تكرار عمليات الشحن و التفريغ ، تتضاءل كفاءة البطارية في وظيفتها، و تبدأ بنيتها بالتقادم و التدهور مما يؤثر سلبا على سعتها و زيادة المقاومة الداخلية. و يعتبر تقادم البطاريات من أهم مواضيع دراسات المناهج و النماذج لتطوير تكنولوجيات تقدير القيمة الاقتصادية النافعة المتبقية بعد انقضاء العمر الافتراضي. (Madani, et al., 2025).

4.2.8. الصيانة

يعتبر هذا النوع من البطاريات خطيرا نظرا لطبيعة الليثيوم كمعدن ناقل و عنصر كيميائي ، فهو يتميز بالنشاط الكيميائي و شدة التفاعل خاصة مع الماء و الهواء ، كما يعرف بحساسيته الشديدة للحرارة مما قد يتسبب في الاشتعال أو الانفجار في حال الشحن الزائد أو الثقب. و عموما تتطلب بطاريات

الليثيوم صيانة دورية اقل مقارنة بالبطاريات التقليدية الأخرى للتأكد من عدم وجود تسربات أو تلف في نظام التخزين ، مما يعني تكاليف مالية اقل في مرحلة التشغيل مقارنة بأنواع بطاريات أخرى .

5.2.8. نهاية دورة الحياة (التدوير و الاستبدال)

تنتهي دورة الحياة بانقضاء العمر الإنتاجي الافتراضي للبطارية و تكون 10 سنوات في المتوسط و قد تصل إلى 30 سنة، و عندئذ يتم استبدالها دوريا لاسيما في الأنظمة الكهروضوئية التي تتطلب حجما معتبرا للتخزين للحفاظ على متطلبات تشغيل النظام بكفاءة. كما يمكن إعادة تدوير بعض المواد المستخدمة في صناعتها و الاستفادة منها كالكوبالت و النيكل و الليثيوم و الغرافيث مما يسهم كثيرا في الحد من الآثار البيئية و التقليل من التكاليف الإضافية المترتبة عن استخراج مواد خام جديدة .

إن دراسة دورة حياة البطارية للمنتج تخضع لمنهجية تطبق على المراحل السابقة (BELEM, 2005) ، حسب المنظمة الدولية للتقييس (Debashri Paul, 2024, p. 5) و تتلخص في :

-تحديد الهدف و النطاق: الوحدة الوظيفية، حدود النظام، المنهج، الافتراضات/ القيود، نطاق الأثر.

-جرد البيانات: المدخلات و المخرجات، تدفق المواد و الطاقة ، الانبعاثات ، استخدام الموارد.

-تقييم الأثر: ربط السبب/ النتيجة ، الانبعاثات ، المساهمة في فئات الأثر (المناخ ، الأوزون ...)، المعايير.

-تفسير النتائج: الحساسيات و اليقين لنتائج الجرد، تقييم فئات الأثر، التحقق من النتائج، التوصيات.

9. تحليل المؤشرات الاقتصادية و البيئية ضمن دورة حياة بطارية الليثيوم

لحساب تكلفة نظام التخزين نميز بين نوعين من التكاليف هي تكاليف الاستثمار الأولي و تكاليف التشغيل و نتطرق إلى مجموعة من المؤشرات الاقتصادية اللازمة لتقييم دورة حياة البطارية و أهمها:

1.9. تكلفة التخزين المستوية LCOS

مقياس اقتصادي يعبر عن تكلفة الكهرباء الثابتة المسترجعة، و هو خاص بدراسات دورة الحياة للمنتج في مجال الطاقة، و يحسب بنسبة تكلفة الكيلواط ساعي الواحد المقدر بإجمالي الاستثمار (التكاليف المالية المباشرة خلال فترة العمر الإنتاجي) إلى كمية الكهرباء المنتجة خلال نفس الفترة ، مع الإشارة إلى أن التكاليف المقصودة هي المرتبطة بالعمر الإنتاجي (التشغيلي) فقط و لا تحتسب تكاليف

التدوير و المعالجة ، و يعتبر مؤشرا هاما في دراسات دورة الحياة إذ يستعمل كمؤشر شامل للقدرة التنافسية لتقنيات التخزين بل يمثل المقياس الحقيقي في تقييم و مقارنة التكاليف الاقتصادية لأنظمة التخزين:

2.9. زمن استرجاع الطاقة EPBT

يعبر عن الوقت اللازم لتشغيل النظام حتى يعوض نظام التخزين الطاقة المدمجة المستهلكة في تصنيعه و تركيبه حتى نهاية العمر الاقتصادي ، و هو بذلك يشمل جميع مراحل دورة الحياة و ليس مرحلة الإنتاج و التشغيل فقط. و تتمثل أهمية هذا المؤشر في كونه احد العوامل المحددة لجدوى استثمار نظام التخزين ، فكلما كانت قيمته صغيرة كلما دل ذلك على أن نظام التخزين يسترجع الطاقة في وقت أسرع ، لو افترضنا أن زمن استرداد الطاقة لبطارية معينة هو 5 سنوات ، تعني أنها بعد 5 سنوات الأولى من بدأ تشغيلها ، تخزن أو تعوض قدرا من الطاقة الرمادية يعادل ما استهلك في إنتاجها و تصنيعها ، في حين تخزن قدرا صافيا من الطاقة للسنوات المتبقية من العمر الإنتاجي.

3.9. الطاقة الرمادية (المدمجة) Embodied energy

يتم استهلاك الطاقة في جميع مراحل دورة حياة البطارية وتعتبر الطاقة المدمجة جزءا منه و تعرف على أنها القدر الإجمالي للطاقة المستهلكة اللازمة لتصنيع منتج معين عبر مراحل دورة حياته من استخراج و تعدين المادة الأولية و حتى نهايتها لتشمل التدوير و المعالجة ، مع احتساب نفقات النقل و المعدات و الآلات المهتلكة في ذلك ، يقيس إلى حد بعيد التكلفة الطاقوية الحقيقية للمنتج ، و يرتبط وثيقا ببصمة الكربون لأسباب أهمها تحديد القيمة الاقتصادية للمنتج (NIEMANN, 2006, p. 7).

4.9. الفاقد من الطاقة Energy curtailement

لابد من الإشارة إلى أهمية تخفيف الفاقد أو الهدر من الطاقة و توجد عدة تقنيات في هذا المجال، و يلعب هذا المؤشر دورا هاما لأنه احد محددات المردودية الطاقوية للبطارية . (Luca Migliari, 2025)

5.9. معدل استرداد الطاقة energy recovery value of recycling (ERv)

هو معدل استرجاع أو استرداد الطاقة للمواد المتبقية المعاد تدويرها في نهاية دورة الحياة، و يحسب وفق صيغة رياضية معينة.

10. مقارنة الخصائص الاقتصادية لبطارية الليثيوم و بطارية حمض الرصاص

يتضمن الجدول رقم 2 مقارنة بطارية الليثيوم ببطارية الرصاص من حيث الخصائص الاقتصادية.

جدول 2 : مقارنة بطارية الليثيوم ببطارية الرصاص من حيث الجوانب الاقتصادية

الجوانب	الليثيوم	حمض الرصاص
سعر الشراء / التكلفة المالية للاقتناء	الليثيوم مكلف للغاية فقد يصل سعر البطارية الواحدة إلي ضعفين أو ثلاثة أضعاف سعر بطارية الرصاص، يبلغ سعر الواحدة منها في النظام الكهروضوئي حوالي 600 – 1000 يورو لكل كيلواط ساعي مخزن بين: 2010 – 2015 و يتوقع أن تنخفض بسرعة إلى 200 – 300 يورو في مطلع 2030 بسبب انخفاض تكاليف إنتاجها . (European Commission, 2014)	تتميز بتكلفة منخفضة إذ بلغ سعر الاستثمار الأولي عتبة 200 – 400 يورو لواحد كيلواط ساعي ما بين عامي 2010 – 2015، و تتجه تكاليف إنتاجها تدريجيا لتستقر في حدود 150 – 200 يورو حسب بيانات تقرير المفوضية الأوروبية (European Commission, 2014) .
كفاءة التخزين /المردودية الطاقوية/المزايا الاقتصادية	يتميز الليثيوم بكفاءة طاقوية ممتازة تتراوح بين85– 95 % (Luca Migliari, 2025)، لا تتطلب صيانة، التفريغ الذاتي ضعيف، مقاومة للحرارة، فعالية الاستيعاب. فنوع $C\text{-}LiFePO_4$ له كثافة طاقة أعلى 4 مرات من بطارية الرصاص (T.Lucas & Gajan, 2023, p. 3)	تتراوح كفاءة تخزين الطاقة لبطارية الرصاص بين 70-85% (Stanchev & Hinov, 2025, p. 4) ، تتطلب صيانة و إضافة الماء المقطر دوريا و بانتظام لمراقبة الشحن ، تتميز بتفريغ ذاتي مرتفع نسبيا؛ سريعة التدهور في الحرارة العالية مما يؤثر على العمر الإنتاجي، و مقاومة نسبيا للبرودة لكن بأداء اقل .
الوزن	خفيفة الوزن (بسبب ارتفاع الطاقة الكتلية)	ثقيلة الوزن (بسبب انخفاض الطاقة الكتلية)
العمر الافتراضي بالسنوات Lifetime (years)	يقدر في المتوسط ب 10 سنوات و قد يفوق 30 سنة عند شروط تشغيل مثلى حسب بعض الدراسات.	يتراوح بين 3– 5 سنوات، و لفعالية أكثر يفضل الاستبدال دوريا حسب التقديرات الاقتصادية و التقنية. و يمكن أن يصل إلى 7 سنوات في الظروف المثلى للإستخدام .
العمر الافتراضي	عمر طويل مقارنة بأنواع أخرى إذ يبلغ 2500 –	عمر افتراضي إنتاجي قصير نسبيا يقدر بحوالي

بعدد الدورات Battery lifespan	5000 دورة بعمق تفريغ 80 %. (Stanchev & Hinov, 2025, p. 2)	300 – 600 دورة عند عمق تفريغ 50 %.
عمق التفريغ DOD	عمق التفريغ الآمن للحفاظ على سلامة بطارية الليثيوم يكون في حدود 80 % عادة و قد يصل إلى 100 % كما هو الحال في بطاريات TESLA الشمسية . عمق التفريغ الجيد هو ميزة أساسية في بطارية الليثيوم مقارنة بالرصاص أو غيره أما ، في حالة رفعه مرارا و تكرارا إلى تفريغ كامل أي 100 % فقد يتدنى عدد دوراتها الفعلية حتى 1500 – 2000 .	عمق التفريغ الآمن يقدر ب 50 % ، إذ أن رفع النسبة إلى مستوى أعلى قد يعرض البطارية إلى تدني عمرها الإنتاجي بشكل حاد ليصل إلى 200 – 300 دورة .
تكلفة التخزين المستوية LCOS	تتراوح تكلفة التخزين المستوية لبطارية ليثيوم ايون للميغاواط ساعي بين 120 – 180 دولار، أي ما يمثل أدنى تكلفة تخزين ثابتة ضمن البطاريات المدروسة في ظروف تشغيلية و تمويلية ملائمة، و يتوقع أن تبلغ اقل من 150 دولار لكل ميغاواط ساعي في أفق 2030 بالتوازي مع نزعة تكاليف الليثيوم إلى الانخفاض. (Stanchev & Hinov, 2025, p. 4)	تكلفة التخزين المستوية للرصاص تميل للارتفاع بوضوح بسبب قصر عمرها الإنتاجي ضمن دورة حياتها، و انخفاض كفاءتها مما يؤدي إلى انخفاض تكلفة الوحدة الواحدة من الطاقة المسترجعة . (Luca Migliari, 2025)
زمن استرجاع الطاقة EPBT	زمن استرداد الطاقة في بطاريات الليثيوم اقصر بكثير من الرصاص بفضل كفاءة التشغيل و التخزين و طول العمر الافتراضي مما يسمح بتحصيل الطاقة المستهلكة أسرع و إنتاجية صافية لباقي سنوات عمرها و يقدر في المتوسط : 1 – 4 سنوات .	يقدر الزمن المتوسط لاسترجاع الطاقة المستهلك في إنتاج و تصنيع بطارية بقاعدة الرصاص حوالي 0,7 – 2,5 سنة . بفضل الخصائص الاقتصادية و التقنية المذكورة .

المصدر : من إعداد و تنسيق الباحث اعتمادا على جميع المراجع المذكورة

يبين الجدول 2 مقارنة أهم المؤشرات الاقتصادية بين بطارية الليثيوم و حمض الرصاص، فرغم التكلفة المرتفعة للاستثمار خاصة المرتبطة باستخراج المواد الخام و أعباء التصنيع في تخزين الطاقة بواسطة تكنولوجيا الليثيوم، إلا أن مردوديتها معتبرة على المدى الطويل لارتفاع قدرتها الاستيعابية و انخفاض زمن استرجاع الطاقة إضافة إلى طول عمرها الإنتاجي، و توجد نماذج لتقييم تكلفة التخزين في نظام يعتمد على مصادر متجددة، و يمثل الجدول 3 فرضيات تكاليف تقنيات تخزين و خفض الطاقة في أفق عام 2030.

جدول 3: التكاليف المفترضة لعام 2030 لتقنيات تخزين و إدارة الطلب بخفض الاستهلاك (DIFLEXO)

تقنية التخزين	اختصار التسمية	تكاليف الاستثمار الأولي أو التكاليف الابتدائية للاستثمار (CAPEX)			تكاليف التشغيل و الصيانة السنوية خلال فترة الاستغلال (OPEX)	
		تحويل القدرة ($/KW)	مخزن الطاقة ($/KWh)	العمر الاقتصادي (سنة)	التكاليف المتغيرة ($O\&M^V$) (€/KW)	التكاليف الثابتة ($O\&M^F$) (€/KWh)
الليثيوم ايون	**Li-Ion**	510	200	10	2,6	2,4
كبريتيد الصوديوم	**NaS**	950	333	10	2,0	14,0
أكسدة/ اختزال	**VRFB**	810	110	10	2,0	16,2
التوربينات/ الضخ	**STEP**	1500	-	60	-	22,5
دولاب العطالة	**Flywheel**	600	3500	20	2,0	8,4
حمض الرصاص	**Pb**	390	164	8	0,8	5,5
الهواء المضغوط	**CAES**	600	35	55	1,2	7,8
الهواء المضغوط	**ACAES**	843	40	50	3,1	3,9
إدارة الطلب	**DSM**	10-745	-	10	-	0,001-0,1

source : Manuel Villavicencio, La valeur économique du stockage de l'électricité P : 18

يبين الجدول 3 أن تكاليف الاستثمار الأولي تفوق كثيرا تكاليف الصيانة و التشغيل السنوي لأغلب التقنيات، و هذا ما يميز استثمارات تخزين الطاقة. إلا أن تكاليف التشغيل و الصيانة الثابتة لبطاريات ليثيوم ايون تبدو في مستوياتها الدنيا مقارنة بالأنواع الأخرى. و بما أن تكلفة التخزين المستوية تحتسب كل النفقات الرأسمالية الابتدائية CAPEX ، النفقات التشغيلية OPEX ، الطاقة الإجمالية المسترجعة طول فترة الحياة بالإضافة إلى معدل الخصم (Stanchev & Hinov, 2025, p. 4) ، فإن LCOS الخاصة بالليثيوم اقل بأطوار من الخاصة بحمض الرصاص، و هو تفسير الدلالة الاقتصادية لانخفاض المؤشر مما يعني عدم حاجة بطاريات الليثيوم إلى الصيانة، و انخفاض التكاليف عموما خلال دورة الحياة.

11. مقارنة الخصائص البيئية لبطارية الليثيوم مع بطارية حمض الرصاص

تعتمد دراسات تقييم دورة الحياة على قياس و تقييم الآثار و الجوانب البيئية الفعلية أو المحتملة للمنتج خلال مراحل دورة حياته على مستويات عدة: الأرض (استخدام الأراضي، استهلاك الموارد الاحفورية، استهلاك الموارد المعدنية، السمية، التحمض...)، الهواء (تضرر الأوزون، الاحتباس الحراري، الإشعاعات المؤينة، الأمطار الحمضية، الجسيمات الدقيقة العالقة ..)، الماء (استهلاك، تلوث المياه الجوفية)(Milousi, Souliotis, Arampatzis, & Papaefthimiou, 2019, p. 8) .

يتطلب قياس الأثر البيئي تحديد وحدات مرجعية حسب النوع و الأثر، فلقياس ضرر غاز معين على طبقة الأوزون خلال تصنيع الليثيوم نقوم بحساب حجم غاز ثاني أكسيد الكربون CO_2 المكافئ لإحداث نفس الضرر البيئي، و اختير CO_2 لأنه الأكثر إضرارا بغاز الأوزون O_3 المكون الأساسي للغلاف الجوي. و فيما يلي جدول مقارنة بين بطارية الليثيوم و حمض الرصاص حسب فئات الأثر البيئي.

جدول 4 : مقارنة الخصائص البيئية بين بطارية الليثيوم و بطارية الرصاص

الجوانب البيئية	بطارية ليثيوم ايون (**LIBs**)	بطارية حمض الرصاص (**SLA**)
استخراج المواد الخام Extraction	تتطلب استخراج و تنقية و تعدين معادن نادرة مثل : الليثيوم، الكوبالت، النيكل، مما يستهلك كميات معتبرة من الماء، و أثبتت الدراسات أن	استخراج و تعدين الرصاص ينتج حمض الكبريتيك و انبعاثات CO_2 و يلوث المياه الجوفية (Yudhistira, Khatiwada, &

of raw materials	إنتاج الطن الواحد من الليثيوم يحتاج تبخير حوالي 2000 m^3 من الماء، و هو ما يعني استنزاف احد أهم موارد البيئة و التأثير على النظم الايكولوجية المرتبطة بها.	F, 2022, p. 5) كما أن المعالجة الحرارية في مرحلة التعدين تنتج 30 – 50 كغ من أبخرة الرصاص لكل طن تتم معالجته مما يرفع التركيزات إلى 5000 مغ/كغ من الرصاص (Pb) في بنية الأتربة المحيطة بالمصنع. ما يعني تجاور المعايير الدولية لتقييد التلوث بقدر 25 مرة. (Dimas Alberto Pincay-Pilay, 2025)
الطاقة المدمجة (الرمادية) Embodied energy	تصنيع بطارية الليثيوم يتميز بطاقة رمادية كثيفة، فقد أثبتت دراسات (LCA) أن استهلاك الطاقة خلال مرحلة التصنيع هو الجانب البيئي الأكثر مساهمة في الأثر البيئي لهذه البطاريات، لأنها تحتاج عمليات كيميائية معقدة و تتطلب بيئة جافة للحفاظ على جودتها. (Stanchev & Hinov, 2025, p. 4) ، كما أن إنتاج بطارية بسعة 1 كيلواط ساعي يستهلك 530 KWh من الطاقة الرمادية. (Ivan T. Lucas, 2023, p. 3)	بطارية الرصاص تعتبر اقل تعقيدا في العمليات الصناعية و لهذا تبدو الطاقة الرمادية اقل كثافة من مثيلتها في بطارية الليثيوم .
الفاقد من الطاقة Energy curtailement	الفاقد من الطاقة في بطاريات الليثيوم عند مستوياته الدنيا فهو ذو دلالة اقتصادية معتبرة، و يتراوح الفاقد أثناء دورات الشحن و التفريغ بين 5 – 15 % (Luca Migliari, 2025)	فاقد الطاقة أعلى بكثير من بطارية الليثيوم بسبب مقاومتها الداخلية ، ما يؤثر على المردودية الطاقوية ليتسبب مباشرة في رفع التكلفة المستوية للتخزين . (Luca Migliari, 2025)
مخلفات و انبعاثات التصنيع	عمليات تصنيع الليثيوم تنتج كميات معتبرة من ثاني أكسيد الكربون CO_2 إضافة إلى المذيبات العضوية المتطايرة في الهواء VOC و لها آثار على جودة الهواء.	إن صهر الرصاص و تصنيع حمض الكبريتيك تنتج انبعاثات عالية تحمل مخلفات الرصاص في الهواء و ثاني أكسيد الكبريت SO_2 ذات آثار محلية سيئة و إن كانت قليلة نظرا لطبيعة الرصاص كمعدن ثقيل إضافة إلى تلوث المياه .

الأثر السمي toxicity	تحتوي بطاريات الليثيوم على معادن سامة كالكوبالت و النيكل و الرصاص و النحاس ، و مواد عضوية متطايرة شديدة السمية و القابلية للاشتعال و كلها عوامل تعرض البيئة و السلامة الايكولوجية العامة للخطر في حالة التسرب أو التخلص غير الصحيح .	الرصاص معدن سهل التراكم الحيوي و حمض الكبريتيك القوي، اللذان يدخلان في تركيب إلكتروليت البطارية يجعل منه وسطا حمضيا عالي التركيز مما قد يسبب أضرارا في حال التسرب أو التخلص العشوائي ، إضافة إلى آثار خطيرة على التربة و المياه الجوفية.
الكفاءة التشغيلية / العمر الإنتاجي	عدد دورات الشحن و التفريغ هو احد عوامل تحديد العمر الإنتاجي لبطارية الليثيوم و تتميز بعدد دورات شحن/تفريغ كبير جدا و ذو كفاءة عالية ، فبطاريات من نوع $LiFePO_4$ بسعة 10,24 KWh تحمل تقريبا 5600 دورة عند عمق تفريغ 80 % بكفاءة شحن/تفريغ ≈ 90 % ، و يقدر عمرها التشغيلي بنحو ضعفين مقارنة ببطارية رصاص لها نفس الخصائص(Ivan T. Lucas, 2023, p. 3)	دورة حياة اقصر و اقل كفاءة حسب نفس الدراسة، حزمة بطارية حمض الرصاص بسعة 12,96 KWh تحمل تقريبا 1258 دورة عند عمق تفريغ 80 % بكفاءة شحن/تفريغ ≈ 85 % ، كما أن عمرها التشغيلي يقدر عادة بمئات معدودة فقط من الدورات ، اقل مقارنة بمثيلتها من الليثيوم.
النفايات /إعادة التدوير Recycling	لا تزال معدلات التدوير ضعيفة لهذا النوع، إذ لا تتجاوز 1 % ، كما أن استرجاع الليثيوم و بقايا أخرى غير مجدي اقتصاديا رغم الجهود و الأبحاث لتطوير تكنولوجيات أكثر فعالية في المجال. (Yudhistira, Khatiwada, & F, 2022)	تتميز بطارية الرصاص بأعلى معدل إعادة تدوير ضمن كل الأنواع حيث تفوق 95%. لتصل إلى 99% في بعض الدول المتقدمة، و هذا يعزى إلى بساطة تركيبها، مع الدعم التنظيمي الذي يلزم بتحويل البطاريات القديمة لتدويرها عند اقتناء الجديدة. (Yudhistira, Khatiwada, & F, 2022)
بصمة الكربون Carbone foot print	الليثيوم له بصمة كربون اقل من الرصاص، فهو تنتج 45 % اقل مما ينتجه الكيلواط ساعي للرصاص.عموما البصمة مرتفعة في التصنيع و	في بطارية الرصاص ينتج الكيلواط ساعي الواحد تقريبا 2 كغ من ثاني أكسيد الكربون حسب نفس الدراسة، و عموما بصمة الكربون اقل عند

	تقل نسبيا على مدى العمر الإنتاجي. (Yudhistira, Khatiwada, & F, 2022)، عموما إنتاج بطارية بسعة 1 KWh يصدر ما يعادل 150 كغ من ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. (T.Lucas & Gajan, 2023)	التصنيع و اكبر على المدى المتوسط و الطويل بسبب عملية الاستبدال الدوري .
نهاية دورة الحياة End of life/second life	غالبا تؤول بقايا هذا النوع مع النفايات الصناعية بسبب ضعف نظام التدوير و إدارة المخلفات و عدم النضج التجاري و التقني، مقارنة بالرصاص. يعاد تدوير حوالي 50 % من بطاريات ليثيوم ايون المتاحة في الو.م.ا، في حين يحول الباقي إلى مخلفات مهملة القيمة في توجه الحياة الثانية للبطارية (Stanford University, 2025)	تتميز بطاريات الرصاص بسمية عالية مع نضج تكنولوجيات منظومة التدوير، فهو نموذج جيدا للاقتصاد الدائري حيث تصل نسب التجميع و التدوير إلى 95-99 % ، و لهذا على الصعيد العملي نجد القليل جدا منها نادرا ما يتم رميه دون تدوير، ما يقلل أعباء أو تكاليف التخلص من نفاياتها مقارنة بمخلفات بطاريات الليثيوم. (Stanchev & Hinov, 2025, p. 4)

المصدر : من إعداد الباحث بالاعتماد على جميع المراجع

يبين الجدول 4 أن الآثار البيئية لبطاريات الليثيوم اقل مقارنة ببطاريات الرصاص ، كما أنها تتركز في المراحل الأولى من التصنيع لا سيما مرحلة استخراج و تصنيع المادة الأولية. كما أن بطاريات الرصاص تخلف آثارا سيئة على البيئة خاصة حمض الكبريتيك بمرحلة التدوير و المعالجة في نهاية دورة الحياة.

12. الخاتمة

تتحقق الكفاءة الكلية لأنظمة تخزين و إنتاج الطاقة بتأسيس تكامل مبني على اندماج البعدين الاقتصادي و البيئي، و لهذا تأخذ الأبعاد البيئية في دراسات دورة الحياة منحى جديد في مجال اقتصاديات الطاقة، و قد خلصت الدراسة إلى جملة النتائج التالية:

– تساهم نظم التخزين المركزية و اللامركزية في توجه مستخدم الطاقة من مستهلك نهائي إلى مستهلك و منتج في آن واحد، ما من شانه المساهمة إلى حد بعيد في اقتصاديات الحجم، فكلما زاد حجم الاستثمار

و توسعت المشاريع انخفضت تكلفة تخزين الوحدة الواحدة (تكلفة 1 كلواط ساعي) لتنخفض أسعار إنتاج و تخزين الطاقة الشمسية، و تصبح التكنولوجيا اقل تكلفة و أكثر فعالية من الناحية الاقتصادية.

– إن التخزين الكهرومائي الثابت يعد الأوسع نطاقا و الأكثر شيوعا مقارنة بالتقنيات الأخرى بفضل التكاليف المنخفضة و نضج التكنولوجيا المستخدمة.

– التكاليف الاقتصادية التأسيسية في استثمارات الأنظمة الكهروضوئية مع نظام التخزين المناسب تكون مرتفعة نسبياً، و تنخفض تدريجيا عند تجاوز الطاقة المنتجة 1 كيلواط.

– إن بطاريات الليثيوم أحسن من الرصاص رغم تكلفتها العالية، من حيث المردودية الطاقوية، الطاقة الكتلية و العمر الاقتصادي. كما أن أحسن نوع هو $LiFePO_4$ لمزاياها و ملائمتها للنظم الشمسية.

– تتكون البطارية في نهاية حياتها من بقايا يمكن الاستفادة من قيمتها عن طريق التدوير، أو توظيفها في حياة ثانية. و يواجه ذلك عقبات خلال تطبيقه كغياب مقاييس موحدة و تباين الأنظمة و تفاوت أدائها مما يصعب بناء منظومة صناعية متكاملة و فعالة تشمل جميع مراحل الاسترجاع و التفكيك و التدوير، مع تطبيق دمج الاعتبارات البيئية لمقاييس المنتج (التصميم البيئي) في تصميم و إنتاج البطاريات.

– تعتبر السمية معيارا بالغ الأهمية في تقييم الآثار البيئية، فاستخلاص القيمة المتبقية من مركبات كيميائية سامة للبطارية تتطلب عمليات و تكنولوجيات معالجة و تدوير أكثر تعقيدا من أنواع النفايات الأخرى.

– إن تكاليف التخلص من المواد المتبقية بعد نهاية العمر الإنتاجي للبطارية باستخدام تقنيات التدوير و المعالجة قد تكون مرتفعة نسبيا مقارنة بالقيمة المالية الموجبة التي يمكن توفيرها، إلا أن القيمة المضافة اقتصاديا و اجتماعيا على المدى الطويل تتجه لتكون أكثر استدامة.

– من أهم عوائق تطبيق مناهج دورة الحياة هو الفصل بين الأثر و المظهر، و متابعة و قياس التدفقات المالية و الآثار البيئية، و الفصل بين التكاليف ما يطرح إشكالية التكاليف الاجتماعية.

– إن الاستثمار في تقنيات الطاقة الشمسية مع نظم التخزين المناسبة هو قرار مكلف اقتصاديا لكنه يؤدي دورا مهما في الحد من انبعاثات الكربون ما يعني ضبط بصمة الكربون في الأنظمة الكهروضوئية.

تعد أنظمة التخزين احد الركائز الأساسية لتحديد معالم مستقبل الطاقة العالمي و تحولاته الهيكلية، و لان أسواق الطاقة كباقي الأسواق تسودها ظروف عدم اليقين، المخاطرة و المنافسة غير الكاملة، فطبيعة الدور المستقبلي لهذه الأنظمة يبدو غير واضح المعالم. و مع ذلك يمكن الاستفادة من التجارب العملية المبنية على دراسات دورة الحياة في بعض الدول تقدم رؤية معمقة لتطوير مجال تخزين الطاقة الشمسية الكهروضوئية ضمن اطر متكاملة تشمل الأبعاد الاقتصادية، البيئية، التنظيمية ،لضمان التحول إلى أنظمة طاقة منخفضة الكربون مع مستويات مقبولة من الكفاءة الاقتصادية.

13. المراجع

ADEME. (2012). Feuille de route stratégique: les systèmes de stockage d'énergie.

ADEME. (2019). L'électricité solaire : Mener à bien un projet photovoltaique pour sa maison. Angers: Edition ADEME.

BELEM, G. (2005). L'Analyse du cycle de vie comme outil de développement durable. UQAM. Montréal: Université du Québec.

Debashri Paul, V. P. (2024). Life cycle assessment of lithium-based batteries : Review of sustainability dimensions. Renewable and Sustainable Energy Reviews , 206, 114860.

Dimas Alberto Pincay-Pilay, E. F. (2025). Environmental Impact of Lead-Acid Batteries: A Review of 6.Sustainable Alternatives for Production and Recycling Based on Life Cycle Analysis. Sustainabiliy , 17 (23), 10815.

European Commission. (2014). ETRI 2014: Energy Technology Reference Indicator projections for 2010-2050. Luxembourg: Publications office of the european Union.

Grosjean, C. (2012, Mars 19). Usages de batteries lithium-ion comme fonction de stockage de l'électricité à la convergence des besoins énergétiques de l'habitat solaire et du transport électrique. (U. P. Paoli, Éd.) Consulté le Novembre 1, 2025, sur HAL open science : https://theses.hal.science/tel-00802060v1

GUNT Hamburg. (2024). Energies renouvelables et efficacité énergétique . Hamburg: G.U.N.T. Geratebou GmbH.

IRENA. (October 2017). Electricity storage and renewables : Costs and markets to 2030. Abu Dhabi.

Ivan T. Lucas, A. G. (2023, Mars 10). Le stockage de l'énergie électrochimique en technologie Lithium-ion. HAL.

12.Luca Migliari, D. C. (2025). Levelized Cost of Storage (LCOS) of Battery Energy Storage Systems (BESS) Deployed for Photovoltaic Curtailment Mitigation. Energies , 18 (14), 3602.

Madani, S. S., Shabeer, Y., Allard, F., Fowler, M., Ziebert, C., Wang, Z., et al. (2025). A Comprehensive Review on Lithium-Ion Battery Lifetime Prediction and Aging Mechanism Analysis. Batteries , 11 (4), 127.

Milousi, M., Souliotis, M., Arampatzis, G., & Papaefthimiou, S. (2019). Evaluating the Environmental Performance of Solar Energy Systems Through a Combined Life Cycle Assessment and Cost Analysis. Sustainability , 11 (9), 2539.

NIEMANN, E. (2006). L'énergie grise dans la filière batiment et travaux publics. Paris.

R . Kabouche, S. .. (2012). Etude comparative des différentes techniques de stockage de l énergie solaire photovoltaique. Revue des Energies Renouvelables SIENR'12 Ghardaïa , pp. 115 - 129.

Stanchev, P., & Hinov, N. (2025). Comparative Techno-Economic and Life Cycle Assessment of Stationary Energy Storage Systems: Lithium-Ion, Lead-Acid, and Hydrogen. Batteries , 11 (10), 382.

Stanford University. (2025, January 31). Recycling lithium-ion batteries delivers significant environmental benefits. Consulté le May 20, 2026, sur Stanford News: http://www.stanford.edu

T.Lucas, I., & Gajan, A. (2023, Mars 20). Le stockage de l'énergie électrochimique en technologie Lithium-ion. Consulté le Juin 29, 2026, sur https://cnrs.hal.science/hal-04021376v1

Yudhistira, R., Khatiwada, D., & F, S. .. (2022). A comparative life cycle assessment of lithium-ion and lead-acid batteries for grid energy storage. Journal of Cleaner Production , 358, 131999.

سيد محمود سميعي , مُحَمَّد الصالح حسنين. (1995). تخزين الطاقة الشمسية (الجزء الأول). مجلة العلوم و التقنية (34). المملكة العربية السعودية

مُحَمَّد صلاح السبكي ،كاميليا يوسف مُحَمَّد . (2019). الطاقة الكهروشمسية، مصر، وزارة الكهرباء و الطاقة المتجددة.

مُحَمَّد هاشم أبو الخير، ياسر دياب. (2014 - 2015). تخزين الطاقة الكهربائية. سوريا، منشورات جامعة دمشق.