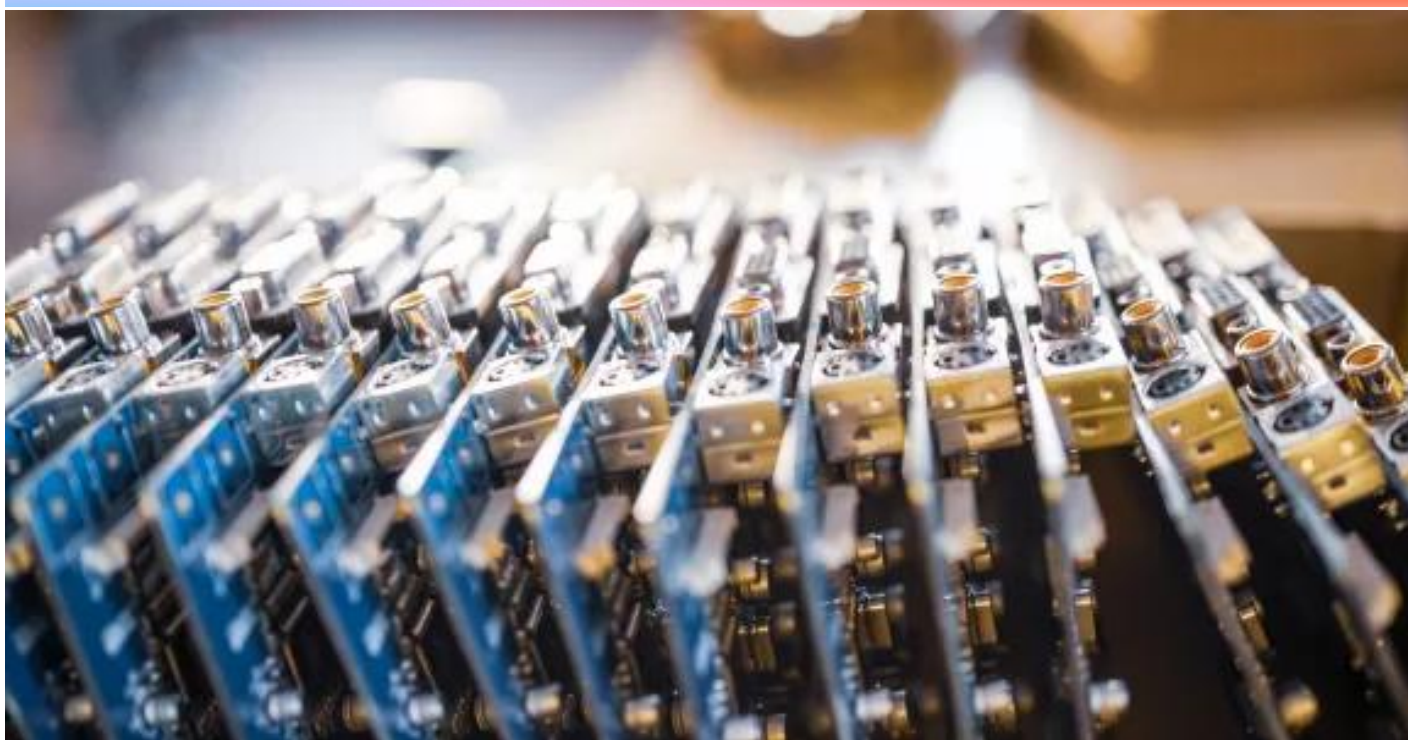




Réutiliser des composants, oui, à condition qu'ils soient compatibles?!

12 mars 2026, 14:01

Stefan Milis

Dans la transition vers une économie circulaire, le **ReX s'impose lentement mais sûrement**. La réutilisation industrielle et le traitement de produits ou de composants usagés présentent des **avantages économiques et environnementaux**. C'est particulièrement vrai pour de nombreux systèmes mécatroniques, c'est-à-dire des systèmes dans lesquels des composants mécaniques, électroniques et logiciels sont intégrés de manière complexe. Une question importante se pose ici : dans quelle mesure les composants de différentes générations, versions ou variantes de produits peuvent-ils être réutilisés ou échangés entre eux??

Dans cet article, nous nous intéressons à **l'importance de la compatibilité pour le ReX**, aux **problèmes** généralement rencontrés avec les systèmes mécatroniques et aux **pistes de solution** possibles. Nous illustrons ces informations par un **cas pratique** concernant des pompes à chaleur résidentielles, et plus particulièrement la gamme Altherma de Daikin.

Dans cet article

[L'importance de la compatibilité dans le ReX](#)

[Facteurs de compatibilité typiques dans les systèmes mécatroniques](#)

[Pistes de solutions?: vers une approche intégrée](#)

[Illustration?: défis de compatibilité dans la série Daikin Altherma](#)

[Conclusion](#)

L'importance de la compatibilité dans le ReX

La compatibilité est la mesure dans laquelle un composant provenant d'un produit en fin de vie est effectivement exploitable/réutilisable dans un autre contexte?: dans un nouveau produit ou comme pièce de rechange pour un modèle similaire de la même génération ou d'une autre. Dans ce cadre, le principe FFF (Fit, ajustement physique, Form, même facteur de forme, et Function, même fonction), est souvent utilisé. Dans la pratique, ces trois dimensions sont essentielles. Pour les produits mécatroniques, la compatibilité comporte souvent une composante logicielle, à savoir la mesure dans laquelle les logiciels, le firmware et les interfaces intégrés se combinent avec le matériel pour garantir un fonctionnement correct et une fonctionnalité optimale. Lorsque la compatibilité peut être garantie, la part de pièces réutilisables augmente, la nécessité de modifications techniques et d'une validation supplémentaire diminue et il devient possible d'organiser plus efficacement la logistique inverse et la gestion du stock. C'est important non seulement pour la mise en œuvre opérationnelle de la refabrication, mais aussi pour son efficacité économique. En outre, une compatibilité maximale permet de prolonger la durée de vie des produits, mais elle contribue aussi à leur mise à niveau/rétrofit.

Afin d'évaluer correctement la compatibilité et le ReX, nous distinguons trois niveaux?:

1. **Version** – configuration fonctionnelle
Différence au niveau de la structure ou de l'application du système.
Exemple?: monobloc ou split, chauffage avec ou sans eau chaude sanitaire.
2. **Génération** – plateforme technologique
Modification fondamentale de la technologie ou de l'architecture.
Exemple?: passage à un autre fluide frigorigène (par exemple, R410A?? R290) ou à une nouvelle plateforme de régulation.
3. **Variante** – différence de performance sur la même plateforme
Mise en œuvre dérivée avec une architecture identique.
Exemple?: différentes classes de puissance (6?kW, 8?kW, 12?kW).

Dans le cas des pompes à chaleur, par exemple, les capteurs de température et de pression et les ventilateurs utilisés peuvent couvrir plusieurs générations, versions et variantes. En revanche, d'autres composants, tels que les compresseurs ou les détendeurs électroniques, dépendent fortement du fluide frigorigène, du dimensionnement et du logiciel et ont donc une compatibilité

limitée, comme le montre le tableau ci-dessous. Nous examinerons plus en détail la compatibilité des pompes à chaleur au point?5.

Composant	Version	Génération (~fluide frigorigène)	Variante (p.ex. puissance)
Capteur de température	?	?	?
Compresseur	?	?	?

Tableau?1?: exemple de compatibilité des capteurs de température et des compresseurs d'une pompe à chaleur. ? = compatible / ? = non compatible

Facteurs de compatibilité typiques dans les systèmes mécatroniques

Dans les systèmes mécatroniques, la compatibilité peut être influencée par des facteurs mécaniques, électroniques et logiciels.

L'évolution technologique est une première cause d'incompatibilité entre différentes versions/génération d'un produit mécatronique. En règle générale, cette évolution est rapide aux premiers stades du cycle de vie d'une catégorie de produits (lancement et croissance), puis se

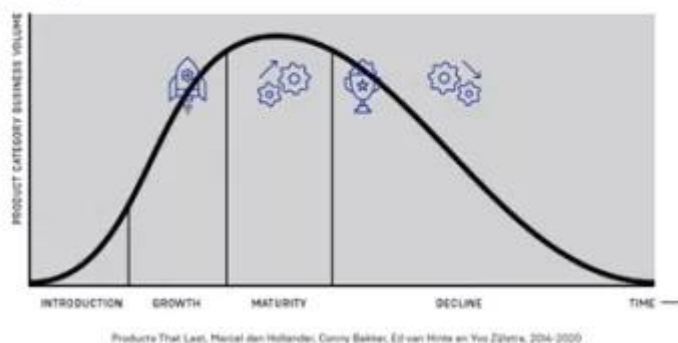
Product market context

▪ The product category life cycle stage

- Introduction & Development
- Growth
- Maturity & saturation
- Decline

▪ The technology change rate

- Upcoming technology
- Mature technology
- Outfacing technology



Les modifications de la législation peuvent également être à l'origine d'évolutions technologiques. L'élimination progressive des fluides frigorigènes à fort effet de serre (passage du R410A au R32 ou au R290) a des répercussions immédiates et de grande ampleur sur la conception des pompes à chaleur. En effet, outre un coefficient GWP (Global Warming Potential, potentiel de réchauffement de la planète) différent, les fluides frigorigènes possèdent des caractéristiques physiques et thermodynamiques différentes (capacité thermique, point d'ébullition, etc.). De ce fait, de nombreux composants tels que les compresseurs, les vannes et les échangeurs de chaleur ne peuvent pas être tout simplement réutilisés sur des pompes à chaleur d'une génération différente, même si, à première vue, leur puissance nominale est identique.

Dans le domaine de **l'électronique et des logiciels**, en particulier, l'évolution technologique a souvent un impact considérable. Étant donné le «?besoin?» toujours plus grand de puissance de calcul, de stockage de données, de communication et de systèmes d'exploitation plus performants, les composants électroniques sont en général plus rapidement obsolètes que les composants mécaniques. Parfois, les anciens circuits imprimés ne sont plus compatibles avec les logiciels d'exploitation ou les protocoles de communication modernes. Même si la connexion physique est

identique, il est possible que les composants réutilisés ne fonctionnent pas en raison de différences au niveau du firmware, de l'interprétation des signaux ou des mécanismes de sécurité. Dans ce cas, le recyclage est souvent la meilleure option.

Les **modifications de la conception et de l'ingénierie** sont une deuxième cause d'incompatibilité. Les interfaces, les tolérances, les matériaux et les méthodes d'assemblage peuvent varier d'une génération à l'autre, voire d'une version plus incrémentale à une autre d'un même produit. Ces modifications sont souvent déclenchées par des suggestions d'amélioration formulées par les utilisateurs. Mais les variations de la disponibilité des matériaux et des composants sur le marché peuvent également en être à l'origine. Des modifications mineures du boîtier, de la position des vis ou de la configuration des connecteurs peuvent entraîner une incompatibilité physique.

Une **normalisation** poussée favorise en outre la compatibilité. Les équipementiers développent souvent des produits qui intègrent des composants spécifiques uniques. En l'absence d'architecture modulaire ou d'interfaces normalisées, l'interchangeabilité est limitée. Les composants sont alors démantelés et n'ont, en soi, qu'une faible valeur de réutilisation.

Enfin, un **accès aisé et traçable aux informations nécessaires** facilite l'évaluation de la compatibilité et de la réutilisation des composants. En effet, sans accès aux nomenclatures d'origine, aux fiches techniques ou aux données de configuration, il est difficile de déterminer si un composant peut être réutilisé dans un autre produit.

Pistes de solutions?: vers une approche intégrée

Une première piste de solution fondamentale consiste à appliquer **le principe du «?Design for Remanufacturing?»** (DfRem, conception anticipant la refabrication). Ici, la réutilisation des composants est prise en compte dès la phase de conception. Nous pensons ici à l'utilisation dans des architectures de produits modulaires, à la normalisation des interfaces et à la mise en œuvre de logiciels d'exploitation configurables. Cette approche augmente considérablement la probabilité de compatibilité entre différentes générations et donne par conséquent souvent lieu à des coûts moindres lors du développement et de la production de nouvelles générations. Le plus grand défi réside souvent dans la gestion de l'incertitude quant à l'avenir?: quel sera le feed-back des utilisateurs, comment la technologie et/ou la législation vont-elles évoluer...??

Les outils numériques jouent également un rôle important. Les systèmes de gestion du cycle de vie des produits (PLM, Product Lifecycle Management), tels que Teamcenter de Siemens ou Windchill de PTC, permettent une gestion systématique et transparente des structures des produits, des versions et des relations entre les composants.

Le tableau?2 ci-dessous présente un **exemple fictif mais réaliste** de matrice de compatibilité des composants de l'entraînement électrique d'un vélo Gazelle Ultimate?C8.

Donor Component ID	Component	Target Assembly	M
CMP-BES2-MTR	Motor Active Line Plus	Ultimate C8 BES2 (2021)	
CMP-BES2-MTR	Motor Active Line Plus	Ultimate C8 Smart (2023)	
CMP-SMART-MTR	Motor Active Line Smart	Ultimate C8 Smart (2023)	
CMP-SMART-MTR	Motor Active Line Smart	Ultimate C8 BES2 (2020)	
CMP-BES2-BAT500	Battery PowerTube 500	Ultimate C8 BES2 (2021)	
CMP-BES2-BAT500	Battery PowerTube 500	Ultimate C8 Smart (2023)	
CMP-SMART-BAT750	Battery PowerTube 750	Ultimate C8 Smart (2023)	
CMP-SMART-BAT750	Battery PowerTube 750	Ultimate C8 BES2 (2020)	
CMP-BES2-DISP	Display Purion	Ultimate C8 BES2 (2021)	
CMP-BES2-DISP	Display Purion	Ultimate C8 Smart (2023)	
CMP-SMART-DISP	Display Kiox 300	Ultimate C8 Smart (2023)	
CMP-SMART-DISP	Display Kiox 300	Ultimate C8 BES2 (2020)	
CMP-BOS-HARN-BES2	Wiring Harness BES2	Ultimate C8 BES2 (2021)	
CMP-BOS-HARN-BES2	Wiring Harness BES2	Ultimate C8 Smart (2023)	
CMP-BOS-HARN-SMART	Wiring Harness Smart	Ultimate C8 Smart (2023)	
CMP-BOS-HARN-SMART	Wiring Harness Smart	Ultimate C8 BES2 (2020)	
CMP-SPEED-SENS	Speed sensor	Ultimate C8 BES2 (2020)	
CMP-SPEED-SENS	Speed sensor	Ultimate C8 Smart (2023)	

Tableau 2?: exemple de la compatibilité en vue de la réutilisation de quelques composants d'un vélo élec

Légende?:

- ? Compatible – D'un point de vue technique, peut être systématiquement utilisé dans le système cible?; n
- ? Conditionnel – Mécaniquement adapté, mais une validation, un étalonnage, une configuration ou une a
- ? Incompatible – Ne peut pas être utilisé en raison de limitations liées au protocole, au firmware, à l'auth

Cet exemple montre que la **compatibilité** n'est pas un détail technique mais une **condition système**. Elle n'est pas une simple propriété «?OK/pas OK?» d'un composant, mais une relation directionnelle entre un composant donneur concret et un système cible spécifique.

Les composants simples non liés à une plateforme (comme les capteurs) sont souvent facilement réutilisables, tandis que les nœuds du système tels que le moteur, la batterie, le contrôleur et l'écran sont très spécifiques à la plateforme. L'authentification, l'appariement du firmware et les protocoles de communication peuvent rendre la réutilisation entre différentes plates-formes pratiquement impossible . Dans la pratique, l'unité complète doit alors souvent être remplacée. La faisabilité du ReX n'est donc pas une propriété du composant en soi, mais du système, de la gouvernance et des choix de conception dans lesquels il fonctionne.

Dans les cas où les nomenclatures d'origine sont manquantes, la rétro-ingénierie offre une solution. La reconstitution inverse de la nomenclature permet de déterminer quelles sont les pièces réutilisables. Les outils qui analysent la compatibilité sur la base du principe Fit, Form et Function (FFF) aident les ingénieurs à trouver des alternatives ou des substituts appropriés.

En outre, il est **essentiel d'intégrer la gestion de l'obsolescence dans le processus de ReX**. L'utilisation de bases de données telles que SiliconExpert ou IHS permet de vérifier quels composants sont en fin de vie et quelles solutions sont disponibles pour leur remplacement. Les tableaux de références croisées pour les composants permettent de gérer les relations de remplacement (par exemple, le composant A123 est remplacé par le composant A456), facilitant ainsi les décisions en matière de compatibilité.

En résumé, une **approche** se compose généralement de **trois étapes?**:



Analyse de la situation as is

- Dans la famille de produits existante
- À travers les générations/versions
- Techniques :
 - PLM
 - Rétro-ingénierie

- A
- b
- T

Illustration?: défis de compatibilité dans la série Daikin Altherma

Les pompes à chaleur Altherma de Daikin constituent un cas représentatif. Il existe en effet plusieurs problèmes de compatibilité entre les troisième (Altherma?3) et quatrième (Altherma?4?H) générations.

- Le passage du fluide frigorigène R32 au R290 a des répercussions sur l'ensemble de la conception thermodynamique d'une pompe à chaleur, et donc, sur son dimensionnement, sa commande, ses capteurs et son système de sécurité. L'incompatibilité d'un grand nombre de composants entre les différentes générations de produits est dès lors inévitable.
- Au sein d'une même génération, les circuits imprimés de commande peuvent présenter des différences au niveau du logiciel et de la logique de communication, ce qui les rend difficilement interchangeables.
- De plus, les modules hydrauliques des systèmes splits et monoblocs diffèrent en ce qui concerne la configuration du raccordement et ne sont donc



La **compatibilité évolue positivement**. Les capteurs de température et de pression, par exemple, sont standardisés sur de nombreux modèles et donc largement utilisables. Les ventilateurs et les moteurs de ventilateur sont eux aussi souvent compatibles avec plusieurs classes de puissance. En outre, **Daikin s'engage à établir une matrice de compatibilité systématique**. L'indication de la compatibilité à l'aide des symboles ? (entièrement compatible), ? (utilisable sous condition) et ? (pas compatible) fournit des indications pratiques aux équipes en charge de la refabrication.

Conclusion

La **compatibilité** n'est pas une question secondaire, mais une **condition essentielle** pour une refabrication évolutive et rentable des systèmes mécatroniques. Sans gestion de la compatibilité, la refabrication reste limitée à la récupération ad hoc de composants individuels, avec une valeur ajoutée structurelle limitée.

En **intégrant les principes de conception** en vue de la compatibilité, en **utilisant des outils numériques de visualisation et d'analyse** et en **gérant systématiquement les données relatives au cycle de vie et aux variantes**, les entreprises peuvent faire passer la refabrication à la vitesse supérieure. Dans des secteurs tels que l'HVAC, l'automatisation industrielle, la mobilité

et l'électronique grand public, la compatibilité deviendra un critère de conception fondamental.

Cet article a été rédigé dans le cadre du projet HEATReX, un Living Lab Circular Economy financé par Vlaio.



Remerciements aux partenaires du projet HEATReX



cl
WARM

Auteurs



Stefan Milis