Éco-conception logicielle pour systèmes durables : retours d'expérience en matière de mobilité et de gestion forestière

Christophe Ponsard [1], **Bérengère Nihoul** [1], **Mounir Touzani** [2]

1. *CETIC - Centre de recherche, Gosselies, Belgique*
   {christophe.ponsard,berengere.nihoul}@cetic.be
2. *Chercheur indépendant, Toulouse, France*
   mtouzani64@gmail.com

RÉSUMÉ. *La durabilité est une préoccupation majeure du 21ème siècle. La révolution numérique engendre des opportunités mais également de nouvelles menaces. Le constat actuel est que les décisions de conception liées à la durabilité restent souvent implicites et résultent d'un processus impliquant des synergies et des compromis entre de nombreuses exigences non-fonctionnelles. L'objectif de cet article est d'identifier ces décisions et de mieux expliciter ce processus pour s'assurer de sa cohérence. Notre démarche s'appuie une série d'outils méthodologiques identifiés dans la littérature couplée avec deux retours d'expérience : un partage de service de navettes, analysé de manière rétrospective, et un système de gestion éco-responsable d'un domaine forestier, mené selon une démarche participative.*

ABSTRACT. *Sustainability has become a major concern of our time. The present digital revolution is the source of both opportunities and threats. A fact is that sustainability design decisions remain most of the time implicit and result from a process involving synergies and trade-offs among many non-functional requirements. The purpose of this paper is to identify such decisions and make the process more explicit and tool supported. For this, we rely on two case studies (1) in mobility, to report on analysis and design tools, and (2) in forest management, to validate participatory tools.*

MOTS-CLÉS : *Informatique durable, développement durable, living lab, analyse orientée but, optimisation, étude de cas*

KEYWORDS: *Sustainable Computing, Sustainable Development, Living Lab, Goal-Oriented Analysis, Optimisation, Case Study*

---

1. Introduction

La durabilité est devenue un défi majeur de notre siècle. Nous sommes actuellement confrontés à la réalité et même aux conséquences de l'atteinte des limites fondamentales des ressources de notre planète Terre. En 1987, le rapport Brundtland des Nations Unies avait déjà défini le développement durable (ou soutenable) comme « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs » (Nations, 1987). Depuis ce rapport, l'énorme expansion des technologies de l'information et de la communication (TIC) a créé une nouvelle économie digitale qui constitue d'une part une opportunité pour une gestion plus durable de nos systèmes notamment via les possibilités de dématérialisation et d'optimisation de l'usage de nos ressources. D'autre part, ce progrès technologique peut également générer des menaces, compte tenu de l'énorme consommation de ressources pour faire fonctionner les terminaux, les réseaux, les centres de stockage et plus récemment les cryptomonnaies ainsi que la technologie blockchain (Vickery, 2012). En matière de consommation énergétique, la part de notre nouvelle « économie digitale » a bondi de 1% en 2006, 2% en 2012 et jusqu'à 7% en 2018. De nombreux experts estiment que l'économie digitale pourrait approcher les 20% vers 2020, avec une croissance de l'ordre de 10% par an (Greenpeace, 2017).

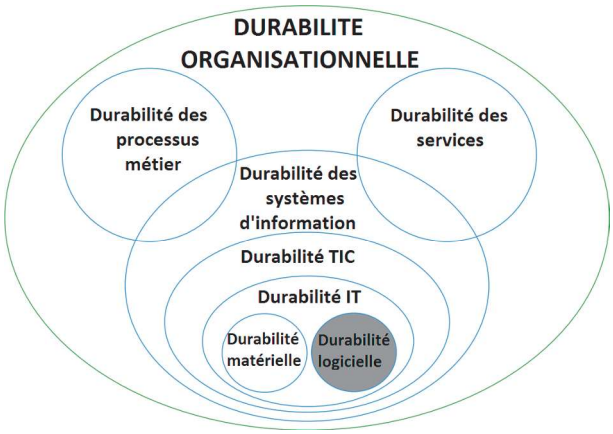

Figure 1. Différents niveaux de durabilité (Calero, Piattini, 2015)

Le développement durable repose sur trois grands piliers (IUCN, 2006) :

– une *dimension environnementale* visant à préserver, améliorer et valoriser l'environnement et les ressources naturelles sur le long terme,

– une *dimension sociale* afin de satisfaire les besoins humains de manière équitable, notamment en matière de santé, logement, consommation, éducation, etc. ,

– une *dimension économique* pour développer la croissance et l'efficacité économique, à travers des modes de production et de consommation durable.

Au sein d'une organisation, l'aspect logiciel durable est enfoui au coeur de plusieurs couches successives depuis la couche métier traitant des aspects processus, des

services et du système d'information (SI), puis de sa composante TIC avant d'atteindre le niveau IT d'infrastructure matérielle et logicielle, comme illustré à la figure 1 tirée de (Calero, Piattini, 2015). Malgré ce manque de visibilité, les logiciels jouent un rôle important et leur durabilité a été identifiée parmi les principales exigences non fonctionnelles du XXIe siècle (Penzenstadler *et al.*, 2014).

Cependant, la conception de logiciels « durables » n'est pas une tâche facile, car différents aspects liés aux différentes facettes de la durabilité, doivent être pris en compte. Dans cet article, nous nous appuyons sur la terminologie définie par (Calero, Piattini, 2015), qui caractérise deux dimensions complémentaires : la durabilité « PAR » les SI/TIC (aussi appelée « ICT4Green ») et la durabilité « DANS » les SI/TIC (aussi appelé « Green-IT »). Dans le cadre de cet article, nous nous intéressons aux dimensions plus spécialisées suivantes, touchant au logiciel et à l'infrastructure, tout en gardant le système global en perspective.

– *La durabilité PAR le logiciel :* comment le logiciel aide-t-il à assurer la durabilité du système dans lequel il est utilisé ?

– *La durabilité DANS le logiciel :* dans quelle mesure le logiciel est-il durable, du point de vue de l'ingénierie, de l'exécution et de la maintenance du logiciel ?

– *La durabilité DANS l'IT :* dans quelle mesure l'infrastructure informatique est-elle durable (principalement en termes d'efficacité énergétique) ?

Cet article s'appuie sur le processus suivant, qui implique deux études de cas entrecoupées par une phase de prise de recul :

– *un premier cas d'étude en mobilité* très riche au niveau des aspects durabilité. Il a été mené sans démarche explicite et analysé en aval du développement afin d'identifier comment ces dimensions avaient été traitées et si certains aspects auraient pu être traités différemment par une démarche plus consciente

– *une phase de recul*, où des outils et des méthodes intéressantes ont été documentés plus en détail et croisés avec la littérature disponible

– *un second cas d'étude en matière de gestion durable dans le domaine forestier*, où des outils sont appliqués en amont, de manière consciente

Cet article est structuré de la manière suivante : la section 2 présente une série d'outils et méthodes pertinentes en se référant à la littérature du domaine, basé également sur le premier cas d'étude a posteriori qui fait l'objet de la section 3. Ensuite, la section 4 propose un second cas d'étude forestier réalisé plus en amont et qui met l'accent sur les outils participatifs. Enfin, nos conclusions et perspectives sont présentées à la section 5.

2. Outils méthodologiques de conception de systèmes durables

Cette section étudie trois types d'outils utiles pour la conception de système durables : les méthodes dirigées par les objectifs, les méthodes participatives et les bonnes pratiques d'éco-conception.

2.1. Analyse par objectifs

L'ingénierie des exigences orientée buts propose des notations permettant de structurer des buts de différents types d'agents à différents niveaux de raffinements (du plus stratégique au plus opérationnel) et de raisonner également sur la manière dont il peuvent se renforcer ou à l'inverse entrer en conflit. Chaque notation dispose d'une spécificité. La méthode i* (Yu, Mylopoulos, 1997) est plus centrée sur l'organisation, tandis que KAOS (Lamsweerde, 2009) se concentre sur la partition entre les agents du système (dont le logiciel) et de l'environnement (dont les utilisateurs). Enfin, URN-GRL (International Telecommunication Union, 2012) est une variante standardisée orientée entreprise. Concernant la durabilité, différentes techniques ont été proposées et sont rapidement évoquées dans cette section.

Le manifeste de Karlskrona contient neuf principes relatifs à l'aspect systémique, multidisciplinaire, multi-niveaux et le long terme (Becker *et al.*, 2015). Une série de bonnes pratiques dérivée de ce manifeste, a également été proposée pour guider tout le cycle (Oyedeji, Penzenstadler, 2018).

Les trois dimensions de la durabilité présentées dans l'introduction peuvent être visualisées à l'aide d'un diagramme de Venn. Des vues plus riches peuvent aussi être utilisées, notamment le diagramme en toile d'araignée qui capture plus de dimensions et les mesure par rapport à une cible (Becker *et al.*, 2016).

Des structurations par arbres de buts ont été proposées à la fois pour les notations KAOS (Mahaux *et al.*, 2011) et i* (Cabot *et al.*, 2009). Au delà de l'étape d'élaboration du modèle de buts, une guidance pour la prise de décision est également disponible et proposée pour KAOS (Stefan *et al.*, 2011). Il s'agit d'estimer des valeurs du modèle et les coûts/bénéfices/risques associés. Les buts doivent être mesurables, donc disposer d'indicateurs mesurables ou KPI (Key Performance Indicator) dans une échelle pertinente et non pas dans une unité abstraite ou uniquement monétaire. Le besoin de confronter des indicateurs de natures différentes est un moteur qui permet de mettre en place des discussions de nature transverse et multidisciplinaire.

Des techniques de pensée systémique (« system thinking ») peuvent être utilisées pour approfondir l'analyse des interactions positives ou négatives entre des buts, notamment via l'identification de boucles de renforcement et d'affaiblissement (Williams *et al.*, 2017), voire les simuler au moyen de modèles de dynamique des systèmes.

2.2. Approche participative et Living Labs

Un Living Lab est un laboratoire d'innovation ouvert, plaçant les usagers au cœur de la création, afin de concevoir et de développer des produits/services innovants pour répondre aux attentes et besoins de la société (Kusiak, 2007). Il implique des collectivités locales, des entreprises, des laboratoires de recherche, ainsi que des utilisateurs potentiels. Il ajoute ainsi une composante citoyenne à des modèles d'innovation de type triple hélice, associant université, industrie et gouvernement. Un Living Lab est

généralement ancré dans un domaine spécifique et repose en partie sur sa capacité à créer et animer une communauté d'usagers et d'experts.

Le développement logiciel et durable est particulièrement pertinent à analyser dans une telle perspective, au vu de la présence généralisée du logiciel et ses interactions fortes avec les dimensions durables, dans un contexte de la prise de conscience citoyenne face à ses enjeux.

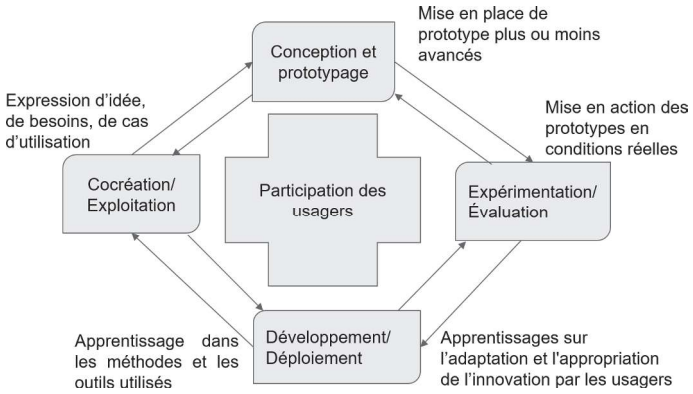

Figure 2. Principe de fonctionnement d'un Living Lab

La méthodologie Living Lab comprend quatre phases illustrées à la figure 2 :

1. l'idéation via des techniques de co-création en atelier avec des usagers,
2. la conception par prototypage, généralement en plusieurs étapes intermédiaires avec des retours vers une phase de co-création,
3. l'expérimentation et la validation qui, après plusieurs retours possibles vers des phases de co-création et de conception, aboutissent à une phase de déploiement,
4. ce déploiement apporte des enseignements à un nouveau cycle de co-création en termes d'usages, d'évolution des produits/services et de méthodologie.

Des Living Lab ont déjà abordé le contexte durable. Ainsi, la transition urbaine durable a été étudiée dans plusieurs pays européens et a montré des impacts directs, indirects et diffus sur les dimensions économiques et environnementales, bien que difficiles à mesurer précisément (Schliwa *et al.*, 2015). Les villes intelligentes intègrent aussi souvent un tel outil, notamment en Finlande où une application de gestion des flux de navetteurs a été expérimentée dans ce contexte (Alam, Porras, 2018). Des facteurs clés de succès concernent l'implication d'acteurs de la « quadruple hélice » de l'innovation, c'est-à-dire que la composante citoyenne doit aussi être couplée à des acteurs issus de l'université, de l'industrie et du gouvernement. La phase d'identification des défis est cruciale et s'appuie naturellement sur les outils d'analyse par objectifs. Le prototype doit soutenir en priorité la validation des questions et non pas sa qualité (notamment il peut être inefficace s'il est utilisé à petite échelle). Une démarche de type Agile est recommandée pour ce type de développement (U4IOT, 2018).

2.3. Méthodes d'éco-conception logicielle

L'éco-conception, dans son sens large est un terme désignant la volonté de concevoir des produits respectant les principes du développement durable et de l'environnement, en recourant « aussi peu que possible aux ressources non renouvelables en leur préférant l'utilisation de ressources renouvelables, exploitées en respectant leur taux de renouvellement et associées à une valorisation des déchets qui favorise le ré-emploi, la réparation et le recyclage » (Ademe, 2012).

En matière de conception logicielle, ceci couvre d'une part une dimension « produit »: ce que le logiciel mobilisera comme ressources de calcul, stockage et réseau lors de son exécution. D'autre part, il y a une dimension « processus » relative aux ressources, en particulier humaines, impliquées dans tout le cycle de vie, depuis les exigences jusqu'à la maintenance (Penzenstadler, 2013).

Au niveau du produit logiciel durable, le travail relève de la formation technique en conception et en déploiement de logiciels. Ces pratiques sont souvent alignées à la recherche de performance mais vont plus loin dans le sens où on peut délibérément simplifier ou éliminer des fonctionnalités en comparant la valeur générée par rapport au coût en ressources. De manière globale, 64% des fonctionnalités livrées sont rarement ou non utilisées (Johnson, 2002). Pour soutenir la démarche, des références existent dans divers domaines. Par exemple, pour les applications web, un guide de 115 conseils a été proposé par un collectif et édité sous une licence créative commons (Bordage, 2015). Concernant le déploiement, les possibilités offertes par les infrastructures virtualisées, sous forme de conteneurs ou de microservices, conduisent à des stratégies durables si elles sont configurées adéquatement (Djemame *et al.*, 2014).

Au niveau du processus de développement, les bonnes pratiques de développement sont d'application. L'attention portée aux exigences par une démarche d'analyse des objectifs et une implication participative permet de limiter le risque que le logiciel ne réponde pas aux besoins, donc d'allonger le cycle de développement. Les méthodes agiles se prêtent naturellement aussi bien à une telle démarche (Tate, 2005).

3. Analyse a posteriori - cas d'étude en mobilité

3.1. Description du cas d'étude et de son contexte

SAM-Drive (ou simplement « SAM » en abrégé) est un service de navettes collectives avec un chauffeur opérant dans la banlieue de Bruxelles en Belgique (Michel Renders, 2012). La mobilité est un défi majeur en matière de développement durable (Banister, 2008). C'est un problème particulièrement marqué dans cette région à forte densité de population avec une offre de transport en commun ne couvrant pas tous les besoins. L'offre SAM lui est complémentaire pour des transports à la demande, visant des publics diversifiés (adolescents, écoliers, sportifs, personnes âgées, personnes isolées, etc.), des créneaux horaires extrêmement flexibles, des besoins spécifiques (re-

tours de soirée, aéroports, gares, médecins, hôpitaux, activités parascolaires...). Les objectifs prioritaires de SAM sont les suivants :

- hausse de la mobilité des citoyens, surtout pour les segments mal couverts
- réduction de l'empreinte environnementale
- renforcement de la sécurité routière
- fourniture d'un rapport qualité/prix très concurrentiel
- création d'emplois durables pour des chauffeurs souvent remis au travail
- contribution réelle aux différents plans publics régionaux de mobilité
- partage de l'expérience au niveau national et international

Un obstacle majeur à l'efficacité et la croissance de SAM était sa sous-utilisation du potentiel des TIC avec une gestion largement manuelle des demandes et du dispatching des courses vers les conducteurs, avec un support essentiellement suivi via des feuilles de calcul. Malgré la présence claire d'objectifs durables, la première priorité de SAM était la mise en place d'une plateforme IT permettant d'automatiser et optimiser ses processus essentiellement, afin de diminuer les coûts d'exploitation tout en minimisant le temps passé sur la route (y compris dans les embouteillages) et en minimisant les temps morts des conducteurs. Indirectement, ceci permet de réduire les émissions de CO_2. La seconde priorité de SAM était d'augmenter le volume et la réactivité du traitement des demandes tout en réduisant le niveau de stress du personnel. Enfin, SAM désirait mettre en œuvre une tarification encourageant le partage via une dégressivité en fonction de l'allongement de la course.

Bien que les objectifs de développement durable soient largement identifiables, ils n'ont pas été identifiés ni traités de manière explicite durant le processus de conception de la plateforme logicielle, avec cependant une équipe de développement relativement bien sensibilisée à cette thématique.

3.2. Méthode d'analyse

Le but de l'analyse est de réaliser une rétrospective du projet afin de mettre en évidence dans quelle mesure des objectifs de durabilité ont été identifiés et traités en tout ou partie malgré la démarche implicite suivie. Il s'agit ensuite, sur cette base, d'illustrer l'intérêt de l'application d'outils et techniques décrits à la section 2.

Notre analyse se base sur les questions de recherche suivantes :

– RQ1 - Comment décider des objectifs de développement durable de manière cohérente au niveau du système ?

– RQ2 - Comment mettre en œuvre durablement le logiciel de manière cohérente PAR/DANS à différents niveaux du système/logiciel/infrastructure ?

– RQ3 - Comment évaluer la durabilité du système résultant ?

Dans cette section, divers outils seront aussi illustrés directement dans leur mise en œuvre. Ils seront présentés plus en détail dans la section 3.

3.3. RQ1 - Analyse des objectifs de développement durable

Afin d'analyser les objectifs de développement durable, les objectifs de SAM décrits à la section précédente ont été analysés. Deux outils se sont avérés utiles :

– une visualisation via un diagramme de Venn permet de positionner et vérifier la couverture des objectifs par rapport aux trois piliers du développement durable (environnemental, social et économique) (IUCN, 2006). La contribution à plusieurs axes est représentée via un placement au niveau des intersections des ensembles.

– une structuration globale des objectifs par arbres de buts selon des méthodologies d'ingénierie des exigences (ici avec la variante KAOS (Lamsweerde, 2009)). Ceci met en évidence quel composant logiciel supporte quel objectif durable et également les synergies et conflits éventuels entre les objectifs de développement durable et d'autres types d'objectifs fonctionnels et non-fonctionnels.

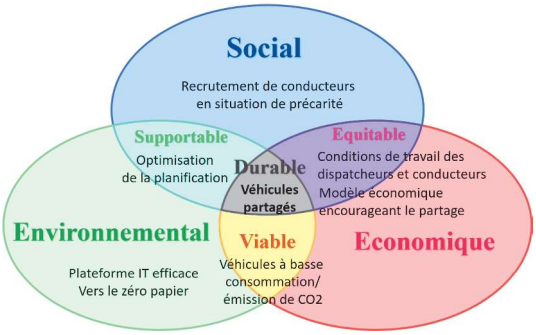

Figure 3. Objectifs de SAM selon les trois piliers du développement durable

La figure 3 présente le positionnement durable des objectifs identifiés :

– *Encourager le partage de courses via un modèle de tarification dégressif en fonction du détour*. Les trois dimensions sont abordées, car l'auto-partage réduit l'empreinte environnementale et l'utilisateur est économiquement récompensé. Sur le plan social, les voyages ensemble sur des trajets récurrents créent des liens.

– *Recruter des travailleurs en situation de précarité*, souvent issus du chômage et qui ont retrouvé un emploi sûr, contrairement aux emplois précaires proposés par la nouvelle économie comme Uber (Younglai, 2015). Cette dimension est sociale.

– *Utiliser une plateforme IT efficace*. Les demandes sont traitées efficacement avec un minimum de ressources informatiques et la suppression de la feuille de route papier, ce qui réduit l'empreinte environnementale.

– *Améliorer les conditions de travail*. La nouvelle solution informatique mieux conçue réduit le stress chez les dispatcheurs et les conducteurs. Elle augmente aussi les capacités opérationnelles. L'amélioration est donc à la fois économique et sociale.

– *Optimiser la planification* pour répondre aux contraintes des conducteurs et minimiser le temps sur la route dans les embouteillages, donc réduire les émissions de carbone. Cet objectif est à la fois environnemental et social.

– *Utilisation de véhicules basse consommation/émission*. Les véhicules sont thermiques à basse consommation et aux dernières normes en matière d'émission avec une évolution prévue vers de l'électrique. Cet objectif est environnemental et économique.

Dans le cas SAM, les objectifs durables étaient aisés à découvrir. Une démarche de décomposition dirigée par les objectifs est utile pour systématiser leur découverte mais aussi pour identifier comment ils s'alignent plus ou moins bien avec d'autres objectifs du système à mettre en place. La figure 4 illustre cette démarche avec une première décomposition réalisée selon les parties prenantes : externes (clients) pour la partie de gauche (objectif de partage) et internes (employés) pour la partie de droite (objectif de qualité de travail). Pour la partie du client, les objectifs plus fins sont relatifs au modèle de tarification, à la prise en compte des contraintes du client, ainsi que la précision et la fiabilité. Ils se traduisent en exigences sur des composants de facturation, de simulation des coûts et d'estimation du temps de trajet. La partie relative au personnel porte sur les dispatcheurs (automatisation/optimisation) et les conducteurs (qualité du planning). Dans la figure 4, les buts durabilité sont annotés avec la mention "DUR". Notons que les buts avec fond jaune (politique de recrutement et type de véhicule) ne sont pas sous la responsabilité d'un logiciel.

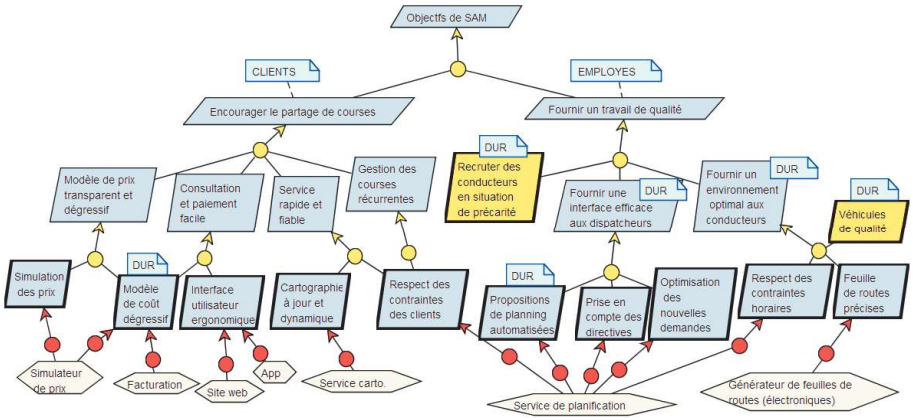

Figure 4. Arbre de raffinement des objectifs pour le système de navettes partagées

Une faiblesse identifiée a posteriori, est la perception limitée et indirecte que SAM avait des besoins des utilisateurs, essentiellement via des retours de conducteurs ou de dispatcheurs en cas de problème. Une implication plus étroite des utilisateurs est possible via des techniques plus récentes de co-création et le recours à des Living Labs présentés à la section 2. Leur utilisation permet de capturer des scénarios innovants de mobilité mais aussi d'initier d'emblée une meilleure adoption.

3.4. RQ2 - Mise en œuvre durable PAR/DANS le logiciel et l'infrastructure

Cette section illustre la durabilité DANS/PAR le logiciel sur deux éléments clefs de SAM : la technologie d'optimisation et l'architecture de l'application.

3.4.1. Moteur d'optimisation efficace et effectif

L'optimisation contribue aux deux facettes de la durabilité, à la fois via son efficacité en mobilité et via une consommation raisonnée de ressources informatiques.

Concernant l'efficacité, le service de planification gère de nombreuses contraintes relatives aux courses des clients et au temps de travail des conducteurs. Une approche durable établit aussi un compromis entre différents objectifs : il faut à la fois répondre rapidement à une demande, augmenter le taux de remplissage des véhicules mais aussi laisser le contrôle à l'équipe de dispatching tout en lui facilitant au maximum la tâche. Pour réaliser ce type de compromis, des KPI pour chaque type d'exigence peuvent être définis : on peut également mesurer le nombre de courses traitées par rapport à celles refusées, la distance totale parcourue, le remplissage moyen des véhicules, la charge de travail des conducteurs, etc.

Concernant l'efficience, une attention importante a été portée au choix de la technologie d'optimisation utilisée. Au lieu de considérer un moteur implémenté dans un langage proche de la machine tel que C/C++, le choix a été fait sur des langages supportant un style plus déclaratif et des constructions algorithmiques efficaces. Il s'agit du moteur Scala OscaR.CBLS, (OscaR, 2012) qui utilise la recherche locale basée sur des contraintes (Van Hentenryck, Michel, 2009). Cette approche est payante car le surcoût de mise en place d'un langage plus efficace est très rapidement amorti par la réduction de la complexité des problèmes de routage qui sont de nature combinatoire. Des confrontations à des outils C++ tels que Google OR-Tools ont confirmé ceci (Landtsheer *et al.*, 2018). Par ailleurs, la meilleure expressivité du langage permet de réduire fortement le temps de développement à qualité égale de la solution.

3.4.2. Gestion durable de l'infrastructure IT

L'interface utilisateur de dispatching s'appuie sur le moteur OscaR qui doit disposer d'une matrice des distances potentiellement pour toutes les paires de points impliqués dans un circuit. En plus de sa taille très importante, cette matrice peut idéalement renvoyer des fonctions de temps de trajet au lieu d'un nombre unique, car la durée du trajet peut varier au cours de la journée. Pour réduire le temps de calcul, des algorithmes efficaces basés sur les « hiérarchies de contraction » peuvent être mis en oeuvre (Geisberger *et al.*, 2008). En outre, un mécanisme de cache d'éviter de recalculer inutilement des temps déjà connus.

Au niveau informatique, l'architecture a été déployée sous forme de conteneurs basés sur la technologie Docker (Hykes, 2013). Du point de vue de l'utilisation des ressources, c'est beaucoup plus léger que d'utiliser un ensemble de machines virtuelles. C'est également plus facile à gérer à travers les différents environnements de développement, test et production (Nagler *et al.*, 2015).

3.5. RQ3 - Évaluation du niveau de durabilité

Comme indiqué précédemment, des KPI permettent le suivi non seulement d'objectifs opérationnels mais aussi d'objectifs de durabilité. Ces indicateurs peuvent être définis à différents niveaux de granularité dans l'arbre des buts : au niveau le plus bas, des indicateurs spécifiques sont utilisés, par exemple : le nombre et pourcentage de demandes traitées par les dispatcheurs, le nombre de kilomètres parcourus et son équivalent en CO_2 d'un point de vue durabilité. A un niveau plus global, des consolidations sous forme monétaires peuvent être réalisées selon le modèle de coût appliqué. Un tableau de bord permettant le suivi de ces KPI est illustré en partie à la figure 5.

PLANNING	... Nouvelles demandes à traiter	... Demandes en attente du client
CONVERSIONS	Ces 30 derniers jours ... Nouveaux clients	Ces 30 derniers jours ... Premières demandes
AUJOURD'HUI	... Passagers transportés	... € Chiffre d'affaire
CÔTÉ CHAUFFEURS	... Km Parcourus aujourd'hui	... H Heures payées

Figure 5. Quelques KPI métier du tableau de bord

Au niveau technique, les performances techniques sont également surveillées, en particulier pour la partie optimisation (par exemple, le cas de problèmes sur-contraints) et la partie matricielle (taux de réussite du cache et exécution du calcul de nouvelles valeurs). Un tableau de bord technique permet de consulter ces indicateurs et s'appuie sur le système de surveillance Open Source Promotheus (Promotheus, 2018). Ce composant est facile à configurer grâce à l'ajout aisé de connecteurs, dont beaucoup sont disponibles dans le commerce. Il peut collecter les données de manière efficace et fournit aussi de bons tableaux de bord qui se rapportent aux indicateurs techniques.

4. Cas d'étude a priori : gestion durable d'un domaine forestier

Cette section présente notre second cas d'étude réalisé en amont du développement. Cette étude est encore en phase d'analyse et se focalise essentiellement sur des outils complémentaires tels que les démarches d'innovation ouverte et participative.

4.1. Description

La forêt wallonne s'inscrit dans un bassin forestier homogène plus large, qui va de la Rhénanie au Luxembourg, en passant par la Lorraine. Ce territoire, appelé Grande Région, totalise 2.375.000 ha de forêt, dont 40% sont privés. Un problème majeur en forêt privée, est le fort taux d'abandon. Il est donc important de pouvoir localiser des zones où le reboisement est déficient pour pouvoir proposer aux propriétaires des

itinéraires de renouvellement innovant et moins onéreux. Par ailleurs, la forêt dispose d'une forte attractivité touristique (balades, observations, ressourcement, etc.) liée à son capital de nature et de biodiversité.

4.2. Objectifs durables

Les produits et services en place n'étant pas toujours cohérents, l'intégration dans le cadre environnemental des dimensions sociales de tourisme et économiques d'exploitation peut être revisitée. Pour des raisons de place, seul le positionnement général des objectifs durables est présenté à l'aide du diagramme de Venn à la figure 6.

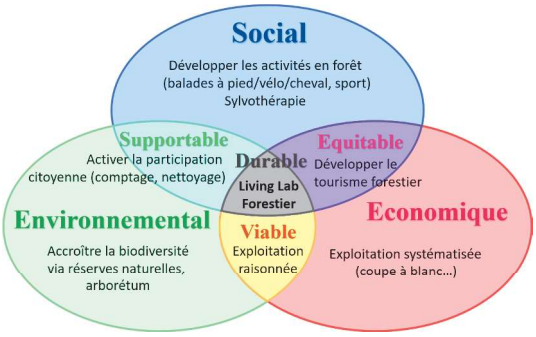

Figure 6. Positionnement des objectifs durables du cas forestier

Notons que le concept durable est largement intégré dans les forêts européennes avec une exploitation rationnelle des ressources, une planification des coupes et l'entretien des forêts, mais principalement avec une vision économique.

4.3. Mise en place d'un Living Lab forestier

Afin de mettre en place un lieu d'échange permettant de faire cohabiter en harmonie les finalités économiques, écologiques et sociales dans le cadre de la forêt de la Grande Région, une approche de Living Lab a été initiée par le RND (RND, 1976). L'objectif est d'explorer des scénarios innovants de couplage de la mise en place d'un outil de surveillance de la forêt et d'un outil de suivi de sa fonction récréative. Les acteurs impliqués sont potentiellement tous les bénéficiaires de la forêt et relèvent tant de la sphère économique d'exploitation du bois et du tourisme que de citoyens se rendant régulièrement ou occasionnellement en forêt, comme l'illustre la figure 7.a.

Une idée directrice est d'éviter de limiter les affectations d'une zone forestière à un usage unique car cela exclut d'emblée de grandes zones et réduit les possibilités de synergies. Par exemple, l'affectation d'une grande surface à une pépinière dégrade à la fois le potentiel touristique et la biodiversité. Le but est plutôt de permettre à un même espace de cumuler plusieurs rôles mais de manière hiérarchisée selon ses caractéristiques et ses potentialités. Ainsi, la figure 7.b illustre une affectation forestière

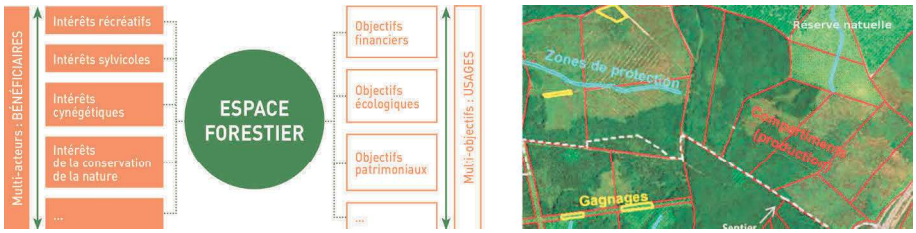

Figure 7. (a) Bénéficiaires et objectifs (b) Exemple d'affectation multiusage

combinant des compartiments de production, qui offrent des sentiers connectant des réserves naturelles et des zones de gagnages pour les animaux sauvages. S'il s'agit, à terme, d'aller vers un concept plus ouvert de forêt, à plus brève échéance, le but est surtout d'intégrer des données forestières (cadastre, imagerie satellite, fréquentation touristique, etc.) et d'étudier de nouveaux services ciblant en particulier la fonction récréative (fréquentation, mesure de services écosystémiques, etc.). Un défi de ce nouveau Living Lab est d'identifier et de mobiliser une communauté d'acteurs couvrant le spectre des bénéficiaires, en les faisant collaborer dans diverses phases itératives décrites dans la section 2. Certains acteurs interviennent plus en amont, au niveau de l'identification des scénarios innovants, et d'autres plus en aval sur la validation de prototypes intégrant diverses sources de données via les outils envisagés.

4.4. Exemples de scénarios et d'applications possibles

Différentes activités peuvent être évoquées et investiguées lors d'ateliers de co-création. Concernant le domaine récréatif, il peut s'agir des parcours découverte/santé, d'initiation à la cueillette de champignons, de l'étude de la faune/flore. Pour les propriétaires privés, il peut s'agir d'une aide pour la gestion de leur parcelle, par exemple, à l'aide d'une application dédiée. Un prototype d'outil peut être envisagé avec, dans un premier temps, le recours à l'existant. Par exemple, la figure 8. (a) montre une fonction d'isochrone proposée par le service ouvert OpenRoute (HeiGIT, 2018). Tandis que la figure 8. (b) illustre une application existante de gestion de parcelle forestière (Actiforet, 2018). Ces applications peuvent être utilisées telles quelles ou rapidement couplées via les mécanismes existants, par exemple, pour partager des informations sur la praticabilité de certains sentiers ou encore pour se mettre en relation avec des personnes disposant d'une parcelle ayant des caractéristiques proches en termes de surface et de peuplement.

Un cas concret récent concerne la gestion de la peste porcine qui sévit depuis 2018 dans cette région et qui touche les sangliers. Celle-ci a nécessité la mise en place d'un périmètre très contraignant d'isolement empêchant tout accès à la forêt. Le périmètre d'isolement nécessaire peut être affiné sur base de modèles et données cartographiques, des analyses d'images satellitaires par des géographes, des observations d'experts forestiers ou encore de citoyens circulant dans des zones autorisées. On peut ainsi imaginer des scénarios de gestion plus dynamique du périmètre de la

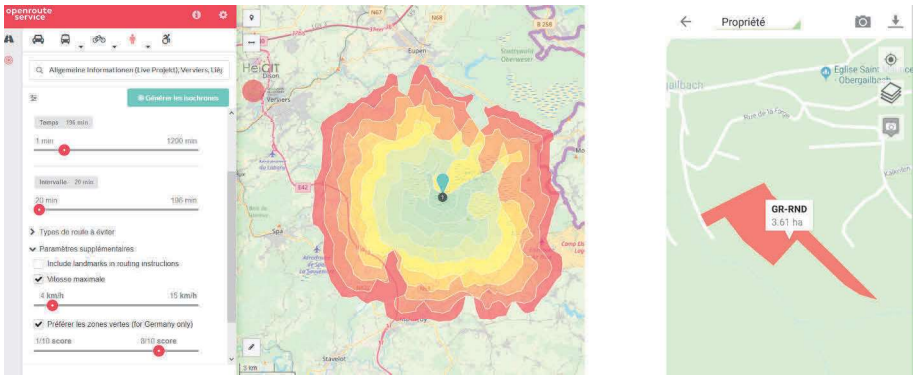

Figure 8. (a) Fonction isochrone pour balade en forêt (b) Gestion d'une propriété

zone afin d'assurer une certaine accessibilité touristique et exploitation économique tout en gérant le risque de propagation de l'épidémie.

5. Conclusions et perspectives

L'éco-conception logicielle dans le contexte de systèmes durables exige d'examiner à la fois comment le logiciel contribue aux objectifs de développement durable du système et comment il est lui-même durable. Divers outils ont pu être identifiés dans la littérature : l'analyse par objectifs, dirigée sur le développement durable, les approches participatives et d'éco-conception logicielle. Afin de les valider, nous avons utilisé deux cas d'étude. Un premier cas réalisé a posteriori a montré l'utilité de l'analyse par objectifs, de techniques d'optimisation, de conception architecturale, ainsi que la surveillance d'indicateurs prenant en compte la durabilité. Le second cas d'étude forestière, réalisé plus en amont, a permis de donner un éclairage centré plus spécifiquement sur la mise en œuvre d'un Living Lab.

Bien évidemment, ce travail ne prétend pas être exhaustif. Nous espérons cependant que ces deux illustrations issues du monde réel et analysées au moyen de plusieurs questions de recherche donnent un retour d'expérience utile à la mise en oeuvre des divers outils identifiés. Nous pensons aussi que la démarche d'analyse proposée et basée sur plusieurs questions de recherche peut s'appliquer plus largement comme guide à la fois pour les chercheurs et les praticiens ayant à réaliser le difficile exercice de proposer un soutien logiciel à un système afin d'en assurer la durabilité.

Nos travaux futurs continueront à s'appuyer sur les deux cas d'applications : pour le cas SAM, une évolution du système est envisagée pour intégrer des scénarios plus flexibles de mobilité. Les développements s'appuieront sur une approche de co-création et co-innovation. Concernant le second cas, nous suivrons l'évolution de la mise en place du Living Lab forestier du RND et assurerons l'animation des premiers accompagnements sur les scénarios esquissés. Les retours collectés continueront à consolider nos connaissances et à être partagés avec la communauté active en la matière.

Remerciements

Ce travail a été financé en partie par les projets SAMOBI et IDEES de la Région wallonne. Nous remercions SAM-Drive, l'asbl Ressources Naturelles Développement, les partenaires des projets RegioWoodII et Agreta, ainsi que les reviewers pour leur retour détaillé.

Bibliographie

Actiforet. (2018). *Ma forêt, carte et gestion.* https://infos.maforet.fr.

Ademe. (2012). *Économie circulaire : bénéfices socioéconomiques de l'écoconception et de l'écologie industrielle.* Ademe et vous, Stratégie & études ; no 33 2012-10-10.

Alam M. T., Porras J. (2018, 11). Architecting and designing sustainable smart city services in a living lab environment. *Technologies*, vol. 6, p. 99.

Banister D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport policy*, vol. 15, n° 2.

Becker C., Betz S., Chitchyan R., Duboc L., Easterbrook S. M., Penzenstadler B. *et al. (2016, Jan). Requirements: The key to sustainability.* IEEE Software*, vol. 33, n° 1, p. 56-65.*

Becker C. et al. (2015). Sustainability design and software: The karlskrona manifesto. In *Proc. of the 37th int. conf. on software engineering.* Piscataway, NJ, USA, IEEE Press.

Bordage F. (2015). *Eco-conception web - les 115 bonnes pratiques*. Eyrolles.

Cabot J. *et al. (2009, May). Integrating sustainability in decision-making processes: A modelling strategy. In* 31st int. conf. on software engineering - companion volume*, p. 207-210.*

Calero C., Piattini M. (2015). Green in software engineering. *Springer International Publishing.*

Djemame K. et al. (2014). Energy Efficiency Embedded Service Lifecycle: Towards an Energy Efficient Cloud Computing Architecture. In *Proc. of the 2nd Int. Conf. on ICT for Sustainability, Stockholm, Sweden.*

Geisberger R. *et al. (2008). Contraction hierarchies: Faster and simpler hierarchical routing in road networks. In* International workshop on experimental and efficient algorithms*, p. 319–333.*

Greenpeace. (2017). Clicking clean: who is winning the race to build a green internet? *http://www.greenpeace.org/usa/global-warming/click-clean.*

HeiGIT. (2018). Open route service. *https://openrouteservice.org.*

Hykes S. (2013). Docker - build, ship, and run any app, anywhere. *https://www.docker.com/.*

International Telecommunication Union. (2012). Recommendation Z.151 (10/12), User Requirements Notation (URN) – Language Def.

IUCN. (2006). The Future of Sustainability Re-thinking Environment and Development in the Twenty-first Century. *Report of the IUCN Renowned Thinkers Meeting.*

Johnson J. (2002). Keynote lecture. *XP Conference, Sardinia.*

Kusiak A. (2007, 01). Innovation: The living laboratory perspective. Computer-Aided Design & Applications*, vol. 4, p. 863-876.*

Lamsweerde A. van. (2009). Requirements engineering - from system goals to UML models to software specifications. *Wiley.*

Landtsheer R. D., Guyot Y., Ospina G., Germeau F., Ponsard C. (2018). Reasoning on sequences in constraint-based local search frameworks. In Integration of Constraint Programming, Artificial Intelligence, and Operations Research - CPAIOR, Delft, June 26-29.

Mahaux M., Heymans P., Saval G. (2011). Discovering sustainability requirements: An experience report. In REFSQ*, vol. 6606. Springer.*

Michel Renders. (2012). Sam-drive - shared shuttles for all. *https://www.sam-drive.be.*

Nagler R. et al. (2015). Sustainability and reproducibility via containerized computing. *Synchrotron Radiation*, vol. 4769, p. 145.

Nations U. (1987). *World commission on environment and development: Our common future.* Oxford Univ. Press http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf.

OscaR. (2012). *OscaR: Scala in OR.* https://bitbucket.org/oscarlib/oscar.

Oyedeji S., Penzenstadler B. (2018). Karlskrona Manifesto: Software Requirement Engineering Good Practices. In *Proc. of the International Workshop RE4SuSy, Banff, Canada.*

Penzenstadler B. (2013). *What does sustainability mean in and for software engineering?* 1st Int. Conf. on ICT for Sustainability (ICT4S), Zürich: ETH E-Collection.

Penzenstadler B. *et al. (2014). Safety, Security, Now Sustainability: The Non-functional Requirement for the 21st Century.* IEEE Software*, vol. 31, n° 3, p. 40-47.*

Promotheus. (2018). From metrics to insight. *https://prometheus.io.*

RND. (1976). Ressources Naturelles Développement asbl. *http://www.rnd.be.*

Schliwa G. et al. (2015). Living labs and sustainability transitions – assessing the impact of urban experimentation.

Stefan D., Letier E., Barrett M., Stella-Sawicki M. (2011). Goal-oriented system modelling for managing environmental sustainability. In *3rd Int. Workshop on Software Research and Climate Change. Lancaster, UK.*

Tate K. (2005). *Sustainable Software Development: An Agile Perspective*. Addison-Wesley.

U4IOT. (2018). *Living Lab Methodology Handbook.* https://u4iot.eu/u4iot-tools.html.

Van Hentenryck P., Michel L. (2009). *Constraint-based local search*. MIT Press.

Vickery G. (2012). *Smarter and Greener? Information Technology and the Environment: Positive or negative impacts?* International Institute for Sustainable Development.

Williams A. *et al. (2017). Systems thinking: A review of sustainability management research.* Journal of Cleaner Production*, vol. 148.*

Younglai R. (2015). Rise of sharing services Uber, Airbnb points to a precarious labour climate. *The Globe and Mail http://bit.do/precarious-sharing-economy.*

Yu E. S. K., Mylopoulos J. (1997, avril). Enterprise modelling for business redesign: The i framework.* SIGGROUP Bull.*, vol. 18, n° 1, p. 59–63.*