



HAL
open science

P.L.M et gestion des évolutions de données techniques : impacts multiples et interchangeabilité restreinte

Gilbert Giacomoni, Jean-Claude Sardas

► **To cite this version:**

Gilbert Giacomoni, Jean-Claude Sardas. P.L.M et gestion des évolutions de données techniques : impacts multiples et interchangeabilité restreinte. Association Information & Management (AIM 2010) " Systèmes d'Information et Développement Durable: regards croisés et contributions ", May 2010, LA ROCHELLE, France. pp.25. hal-00690159

HAL Id: hal-00690159

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-00690159>

Submitted on 21 Apr 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

P.L.M et gestion des évolutions de données techniques : impacts multiples et interchangeabilité restreinte

GIACOMONI Gilbert ; SARDAS Jean-Claude

MINES PARITECH – Centre de Gestion Scientifique
60, Bd Saint Michel, 75006 PARIS

Contact : GIACOMONI Gilbert
gilbert.giacomoni@mines-paristech.fr

RÉSUMÉ : Les principes et les modalités de gestion des évolutions des données techniques proposées par les Product Lifecycle Management (P.L.M) sont étudiées dans les contextes de forte évolutivité des objets techniques et de reproduction en série (sériation). La problématique de la gestion des évolutions ayant des impacts multiples et fréquents sur les configurations n'a pas été résolue sur les plans conceptuel et pratique. Les tentatives de conjugaison des fonctionnalités offertes par les PLM conduisent en fait à des choix inconciliables, et les résultats escomptés doivent donc être relativisés. Les conditions et les principes d'une gestion automatisable des évolutions de configurations sont redéfinis, notamment via une notion d'interchangeabilité restreinte, relative et conditionnelle, et une dénomination des objets permettant d'identifier leur composition en fonction des configurations d'emplois. In fine, une typologie des formalismes possibles de gestion des évolutions de configuration en fonction des situations industrielles génériques conjuguant de manière variable innovation et sériation est proposée. Ces propositions ont été nourries par des travaux conduits en milieu industriel (aéronautique, automobile, industrie à feu continu) et dans la santé. Les principales solutions P.L.M. du marché ont été examinées.

Mots clés : PLM, interchangeabilité, configuration, données techniques, évolutions, ...

P.L.M and technical data evolutions management : multiple impacts and restricted interchangeability

GIACOMONI Gilbert ; SARDAS Jean-Claude

MINES PARITECH – Centre de Gestion Scientifique
60, Bd Saint Michel, 75006 PARIS

Contact : GIACOMONI Gilbert
gilbert.giacomoni@mines-paristech.fr

ABSTRACT : The principles and the modalities proposed by Product Lifecycle Management (P.L.M) to manage the technical data evolutions, are studied in the contexts of intensive renewal and creation of technical objects (innovation) with serial reproduction (serialization). The problem to manage multiple impacts on configurations has not been resolved on theoretical and practical plans yet. The attempts to conjugate the various functionalities offered by PLM lead in fact to irreconcilable choices, and the expected results must be relativized thereof. The conditions and the principles to automate the configurations evolutions management are redefined, in particular via a notion of restricted, relative and conditional interchangeability, and via a new naming of objects, able to identify their composition according to the configurations of uses. In fine, a typology of the possible formalisms to manage the configurations evolutions, according to the generic industrial situations conjugating in a variable way innovation and serialization, is proposed. Investigations were hold in industrial environment (aeronautics, automobile, endless fire industry) and in healthcare. The main P.L.M. solutions of the market have been examined.

Keywords : PLM, interchangeability, configuration, technical data, evolutions, ...

INTRODUCTION

Les entreprises doivent gérer des produits, des installations ou des projets de nature profondément complexe et évolutive. Ce qui représente des milliers de références de définition et plus encore d'articles en exploitation, avec des versions successives et des documents qui leur sont associés tout au long de leur vie. Pour assurer la fiabilité des définitions, des exploitations, des maintenances opérationnelles, il faut être en mesure de garantir la cohérence et la gestion de la qualité de l'ensemble des données techniques : suivi des événements, des modifications nécessaires, des impacts possibles sur l'ensemble, des non-conformités, des actions,... Ces exigences se renforcent dans une économie de la variété où les produits se diversifient et se renouvellent à un rythme accéléré.

Pour améliorer leur compétitivité, réduire les cycles et les coûts, accroître la réactivité, maîtriser la complexification de leurs produits et de leurs procédés, les entreprises doivent s'informatiser, en reliant, progressivement ou simultanément, tous les segments fonctionnels : R&D, ingénierie, marketing, qualité, achats,... Nombre d'entre elles se tournent notamment vers des solutions de type *PLM-Product Lifecycle Management*. Il s'agit d'outils d'entreprise, des progiciels, à la fois modulaires et intégrés (Mostefai et Batouche, 2005) autour d'un noyau unique, permettant de gérer le cycle de vie des produits (Batenburg et al., 2005 ; Pol et al., 2005), de leur conception à leur mise au rebut. En somme, un ensemble logiciel modulaire et intégré, traitant et partageant entre les différents acteurs, toutes les données de l'entreprise représentant les produits et les processus liés à l'innovation et à l'évolution. Autant d'attraits qui font leur séduction et leur assurance. Pour mettre en œuvre de telles instrumentations et engranger rapidement les bénéfices escomptés (Gollac, Mangematin, Moatty, et al., 1998), les entreprises doivent consentir des



efforts et des investissements de grande ampleur. Il nous a paru important aujourd'hui, de nous pencher sur ces solutions pour examiner les principes et les modalités des options de gestion des évolutions des données techniques proposées et voir en quoi ces options répondent aux besoins et permettent ou non de maîtriser ces évolutions, et ce en particulier dans le cas difficile ou les

évolutions se traduisent par des impacts multiples sur les configurations. La clé de la gestion des données techniques est en effet, selon les promoteurs des solutions *PLM*, cette gestion des configurations, qui doit permettre d'avoir, à tout moment, une connaissance exhaustive des données techniques afférentes à un programme, un projet, un produit.

L'exemple ci-après emprunté à l'aéronautique, nous donne un aperçu des enjeux. Le 6 août¹ 2005, au large des côtes siciliennes, un avion ATR²-72 tente un amerrissage tragique. Ses deux moteurs se sont arrêtés quelques minutes plus tôt. La cause principale de l'accident est une erreur d'installation d'une jauge de carburant. L'équipage de l'ATR-72 croyait avoir 3.000 litres de kérosène. La veille, un technicien de maintenance avait dû remplacer la jauge et le système informatique lui avait proposé celle d'un ATR42, censée être interchangeable en taille et en connectique. Seule une petite inscription rappelait la capacité de chaque réservoir et celui de l'ATR-42 était d'une capacité deux fois inférieure à celui de l'ATR-72. Les contrôles extérieurs³ et en cabine n'avaient rien décelé de suspect par rapport aux marges tolérées par le constructeur. Erreur informatique ou erreur humaine ? L'interchangeabilité n'avait pas une valeur totale mais restreinte (valable sous certaines conditions non précisées en informatique). Nous aurions pu tourner notre regard vers l'industrie automobile (source FAQ AXA Winterthur)⁴, logicielle⁵ ou pharmaceutique⁶, les problématiques auraient été analogues.

¹ Source Rome AFP

² Filiale d'EADS, leader mondial des avions à turbopropulseur.

³ Lors du ravitaillement l'avion avait stationné sur une surface non plane.

⁴ Le Crash Recorder installé sur les véhicules, est l'équivalent d'un enregistreur de données d'accidents. Lors de la vente d'un véhicule, le garage doit procéder à son changement. Paradoxalement, les plaques interchangeables avec le Crash Recorder sont déclarées incompatibles.

Pour gérer les évolutions de configuration, tout un panel de fonctionnalités est prévu dans les *PLM*, avec une gestion des évolutions de configuration par dates ou par rangs d'applicabilité⁷, des mises à jour tenant compte des arborescences de codifications normalisées, des cas d'emploi, des interchangeabilités,... Il n'y aurait a priori plus qu'à sélectionner les fonctionnalités nécessaires et suffisantes parmi celles proposées, pour gérer correctement les données techniques d'une activité industrielle donnée. Autrement dit, personnaliser l'usage de l'outil sous un formalisme transcrivant de manière pertinente l'activité désirée. Cet exercice n'est pas si évident (Fixari, Moisson, Weil, 1992 ; Eicher et al., 1984 ; Hatchuel, Sardas, Weil, 1988). Il suppose de savoir choisir le bon formalisme puis de modéliser l'activité dans ce formalisme quitte à adapter certaines pratiques pour les rendre conformes au formalisme ou si c'est possible adapter le formalisme. De plus, rien n'est dit quant à la possibilité et la manière de transcrire des activités non standard, conjuguant innovation intensive et reproduction en série (sériation), avec fréquemment des impacts multiples sur les configurations. Le mode d'emploi d'un outil à géométrie suffisamment variable pour s'adapter à des activités industrielles très différentes prévoit-il aussi les activités industriellement hybrides ?

Nous nous sommes donc mis en quête de comprendre la logique des formalismes sous-tendus par les fonctionnalités proposées dans les *PLM* et comment ils pouvaient se combiner pour certaines activités hybrides, partant de l'idée qu'une entreprise peut, pour tout ou partie de son activité, à un moment ou à un autre de son évolution, devoir conjuguer innovation intensive et sériation. Concernant les activités hybrides, il ressort de nos travaux, que la problématique de la gestion de vagues de modifications ayant des impacts sur les configurations, n'a pas été résolue sur un plan conceptuel et pratique. Les tentatives de conjugaison des fonctionnalités offertes par les *PLM* conduisent en fait à choix inconciliables, et les résultats escomptés doivent donc être prudemment relativisés. Ce sera tout l'objet de la première partie.

En conséquence, nous nous sommes efforcés de définir les conditions et les principes d'une gestion automatisable des activités hybrides, notamment via une notion nouvelle d'interchangeabilité restreinte absente de la sémantique des *PLM*, et un modèle nouveau de dénomination des objets permettant d'identifier leur composition en fonction des configurations d'emplois. Nous ébaucherons in fine une typologie des formalismes possibles de gestion des évolutions de configuration en fonction des situations industrielles génériques conjuguant de manière variable innovation et sériation. Ce sera l'objet de la seconde partie.

1 Problématiques d'une gestion *PLM* des vagues d'évolutions impactant les données techniques et les configurations

Les outils *Product Lifecycle Management (PLM)*, s'appuient sur des technologies avancées qui ont émergé dans l'univers des projets aéronautiques et automobiles (Merminod, Mothe, Rowe, 2009) avant de se diffuser à d'autres secteurs industriels (santé,...). Les *PLM* proposent un environnement ergonomique harmonisé pour tous les acteurs et une base de données unique pour

⁵ A titre d'exemple, l'explosion de la première fusée Ariane V à cause du logiciel de plate forme inertielle repris tel quel d'Ariane IV (interchangeabilité supposée totale). Ariane V, avec des moteurs plus puissants, s'est inclinée plus rapidement qu'Ariane IV pour récupérer l'accélération liée à la rotation de la Terre. Le logiciel a considéré cette inclinaison d'Ariane V non conforme au plan de tir (d'Ariane IV) et a provoqué l'ordre d'auto destruction...

⁶ Le générique partage avec l'original la même substance pharmacologique active (principe actif), la même forme galénique, la même voie d'administration, le même dosage et les mêmes indications (recherche clinique ; autorités sanitaires) que le médicament dont il est la copie. Il est interchangeable avec la préparation originale et équivalent sur le plan thérapeutique. Mais la preuve est complexe et les études cliniques sont établies indirectement, par bioéquivalence. C'est également le cas pour des médicaments originaux lorsqu'il y a modification de leur formulation, changement de processus ou de site de fabrication.

⁷ Le terme d'effectivité est aussi employé pour exprimer la différence entre applicable et appliqué. Effectivité exprime la qualité de l'adéquation entre ce que l'on fait effectivement et ce que l'on voulait faire.

modéliser⁸ les objets, les processus⁹ (Grievies, 2006 ; Cooper, 1990) et les connaissances. Il est possible de gérer des articles (terme générique pour désigner une matière première, un composant, un sous-ensemble, un produit fini), des nomenclatures (structure arborescente des produits), des dossiers (de conception, de fabrication,...), des modifications et leur applicabilité (effectivité), des configurations (variantes, options, substitution,...), rechercher des cas d'emploi (ensemble des produits dans lesquels est montée une pièce), réutiliser des données existantes au sein d'autres produits, ...

Les entreprises doivent leur survie à leurs avancées technologiques et les dynamiques d'innovation génèrent des multiformes. Un multiforme est un objet technique pouvant exister sous plusieurs formes, qui ne sont pas différenciables par des dénominations distinctes, et qui ne sont pas pour autant interchangeables. Un objet paradoxal en somme, dont nous verrons qu'il émerge des environnements hors équilibre où les délais impartis ne permettent plus, ni d'effectuer une analyse combinatoire des risques pouvant garantir une totale équivalence d'emploi, ni de distinguer tous les cas de figures avec des avalanches cascades dans les bases de données et les documentations associées.

Le mode d'emploi d'un PLM prévoit-il un usage adapté à ce genre d'objet ? Il nous faut, pour tenter de répondre à cette question, commencer par comprendre (cf. 1.1 et 1.2) à la fois les différents usages possibles prévus dans les PLM et aussi comment naît cet objet paradoxal qu'est un multiforme (cf 1.3).

1.1 Option d'une gestion des évolutions de configuration par rang ou date : principe d'applicabilité pour productions multi-unitaires

Partons de la description la plus simple possible d'un objet technique (Simondon, 1958) : un ensemble d'éléments liés entre eux, globalement solidaires dans leur fonctionnement. Cela se matérialise par une liste des éléments entrant dans la composition de l'objet et par des indications sur la façon de réaliser l'objet. La documentation accompagnant des produits livrés en kit à monter soi-même donne une bonne illustration de ce cas de figure simple.

A un instant initial, la définition de l'objet (c'est-à-dire sa composition et son mode de réalisation) est supposée partagée par l'ensemble des acteurs et tient lieu de référentiel industriel d'origine. Cette définition ne peut rester figée dans le temps, en raison d'une part de l'innovation (en particulier l'innovation incrémentale) et d'autre part de la nécessité de corriger les erreurs, de prévenir les risques, et d'améliorer la qualité des produits. Elle va donc évoluer au rythme des modifications apportées. Ces modifications sont instruites, classées, pesées et soupesées, en fonction des impacts générés. Une première manière de gérer les états successifs de la définition est d'en mesurer les écarts par rapport à l'original en recensant les modifications survenues. Dans cette logique, l'objet technique est défini avec sa définition d'origine, augmentée des modifications applicables pour des exemplaires donnés. C'est ainsi que peuvent se coordonner les différents intervenants (Hatchuel, Saidi-Kabeche, Sardas, 1997). A compter d'une date, d'un contrat client, ou d'un rang donné (numéro d'exemplaire de l'objet) généralement négocié(e) en fonction des stocks existants pour limiter les obsolescences, l'ajout des modifications doit être fait.

On reconnaît parfaitement cette pratique dans le cas ci-après : « Réglage moteur, modification d'une porte ou d'un câble électrique, chaque semaine, (...) une cinquantaine de nouvelles modifications. Minutieuses et rigoureuses, ces opérations d'analyse d'impact sur la

⁸ Données techniques, spécifications, nomenclatures, gammes, ..., et séquençement des processus.

⁹ Automatisation de certaines tâches de conception ou de production

documentation applicable, de cas d'emploi, de simulation de résultat et de synthèse s'exécutent très lentement en comparaison à d'autres industries. Normal lorsque l'on sait que chaque modification (...) équivaut à un changement sur le seuil de tir de Kourou et surtout sur le lanceur. Et vu que ce dernier est estimé à 130 millions d'euros, mieux vaut ne pas se tromper. Avec, fin février 2007, 25 vols commerciaux réussis pour seulement 4 échecs, Ariane 5 vise l'excellence. » (Fodor X., 2008).

Une manière simple de comprendre cette logique est de considérer le cas du mode d'emploi d'un produit, prévu pour des consommateurs de différents pays dont les dispositifs légaux respectifs (normes, réglementations,...) n'évoluent pas de manière harmonisée. Le mode d'emploi doit toujours respecter les derniers dispositifs légaux en vigueur (formulation, informations, mentions légales,...). Supposons que le produit lui-même demeure inchangé et que seul le mode d'emploi doit s'adapter à l'évolution de la réglementation dans un des pays couverts. Un mode d'emploi conçu avec une page par langue (la page 1 en français, la page 2 en russe, la page 3 en chinois,...) n'offre guère d'autres choix, dans le cas où, pour un pays donné, la norme applicable évolue à une date donnée, que de rééditer l'intégralité du mode d'emploi qu'il faudra insérer dans les cartons d'emballage à compter de la date prévue, avec la modification n° M à la page n° P. Ainsi, pour contrôler la bonne version du mode d'emploi correspondant à un produit vendu à une date et dans un pays donné, il est nécessaire de s'assurer que la modification n° M à la page n° P est bien présente par rapport à la version d'origine.

Les cas de figures entrant dans ce schéma sont nombreux. On peut prendre l'exemple d'une prescription (correspondant à la définition d'un objet technique) de médicaments (éléments composant de cet objet technique) pour un patient hospitalisé. A chaque visite du médecin et en fonction de son état, la prescription peut évoluer. Un médicament peut être remplacé, ou seule sa posologie peut être réajustée. C'est une gestion nominative (nom du patient), chaque fois l'ensemble de la prescription (pour ce malade précis) dans sa dernière version (date de la dernière visite) est prise en référence, pour éviter une erreur de médication croisée.

Cette philosophie gestionnaire est essentiellement sécuritaire et convient uniquement pour des productions à l'unité ou en très petites séries. Il suffit d'avoir à l'esprit l'exemple du mode d'emploi et de l'imaginer englobant la description complète de l'équipement (composition, matières, configuration,...), pour matérialiser très vite la lourdeur et le coût d'une réédition systématique à la moindre modification de page. C'est de tonnes de documentation qu'il s'agirait pour un équipement industriel. Impossible de reproduire en série dans de telles conditions. Du reste, cette pratique s'accommode mal des contraintes de dépannage. Le remplacement d'un élément solidaire de l'objet global ne peut être considéré isolément et implique la reproduction intégrale de l'objet. Le remplacement d'une page implique le remplacement de l'ensemble du mode d'emploi.

Pour spécialiser les productions, accroître la réactivité, assurer le réassort, reproduire en série (série) les différents éléments, la condition préalable est donc une définition gérable de manière autonome de chaque élément par rapport à l'ensemble de l'objet. Il faut dans cette optique que la définition de chaque élément précise quelles modifications lui sont appliquées et qu'un ensemble d'éléments modifiés incorpore exactement les modifications prévues à compter d'un rang (d'une date,...) donné. C'est ce que nous allons développer maintenant.

1.2 Option d'une gestion des évolutions de configuration par mises à jour des arborescences de codifications : principe d'interchangeabilité pour productions sériées

Par rapport au formalisme précédent, où chaque objet était identifié dans sa globalité, une identification (codification normalisée)¹⁰ unique est cette fois attribuée à chaque élément. Elle est commune avec sa définition¹¹ et suffisante pour le reproduire. Si nous reprenons notre exemple du mode d'emploi polyglotte, cela revient à concevoir autant de modes d'emploi différents qu'il y a de langues différentes. Chacun aurait sa propre identification et sa reproduction serait autonome.

Il est évident qu'en cas d'évolution de la norme d'un pays donné, il suffirait de modifier uniquement le mode d'emploi destiné au pays concerné et de l'identifier différemment pour ne pas confondre les versions successives. Mais une fois le mode d'emploi dans sa bonne version inséré dans le carton d'emballage, comment repérer parmi tous les cartons, ceux destinés aux pays dont la norme a changé ?

Plusieurs solutions sont envisageables. Les stocks de la version précédente pourraient être épuisés avant que ceux de la nouvelle version ne soient constitués. Mais cette solution n'est pas toujours possible. Par exemple en raison du réassort ou du dépannage. Toutes les versions doivent être disponibles si un client veut remplacer un équipement par un modèle strictement identique ou pour effectuer un échange standard. De plus, une version anglaise n'est pas restreinte au seul pays affecté par une évolution normative. Plusieurs pays peuvent être destinataires de la langue anglaise. Il serait contreproductif de réduire les quantités économiques à lancer en impression, en limitant la durée de vie d'une version juste pour éviter la survivance des versions successives.

Une autre solution pourrait consister à identifier différemment les cartons en fonction de la version du mode d'emploi qu'ils contiennent. Cette solution n'est pas toujours possible non plus. Car si le mode d'emploi concerne un équipement qui doit être intégré dans un autre ensemble plus important, jusqu'où va-t-il falloir répercuter la modification (marquages physiques, bases de données,...) ? De plus que se passe-t-il si les évolutions se démultiplient avec la multitude de normes (recyclage, signalétique,...) et directives applicables ? On voit bien que la distinction systématique des versions peut atteindre ses limites dès que le scénario se complexifie un peu.

Une notion vient pallier aux répercussions en chaîne d'une modification : l'interchangeabilité¹². Par exemple, pour un carton contenant un mode d'emploi de langue anglaise, destiné aux pays anglophones non concernés par l'évolution normative (par exemple tous sauf l'Australie), la version du mode d'emploi est totalement indifférente. Les cartons destinés à ces pays sont interchangeables. Mais il suffira qu'une autre norme évolue à son tour dans un autre pays anglophone (USA), pour que l'interchangeabilité soit reconsidérée. Prenons l'exemple d'un indicateur lumineux, vert ou rouge, pouvant signifier « en surveillance » ou « en anomalie », suivant les pays. Un pays peut imposer d'harmoniser les couleurs entre tous les fabricants, par exemple le vert, et les modes d'emplois doivent alors être modifiés en conséquence. Pour les autres pays, la signalétique demeure indifférente. Mais ultérieurement, un de ces autres pays peut imposer le rouge. Il est évident que l'indifférence (l'interchangeabilité) antérieurement consentie n'est alors plus valable.

Nous allons essayer de généraliser les principes illustrés dans ces exemples. Tous les éléments constituent une population et il suffit d'établir des liens entre eux suivant une logique d'assemblage donnée (arborescence) pour constituer des sous-ensembles qui deviennent eux-mêmes des éléments, puis des ensembles de sous-ensembles (devenus éléments) qui correspondent aux objets

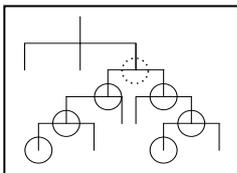
¹⁰ Alphanumériques

¹¹ Ensemble des dossiers de définition, données techniques, plans, modèles CAO,...

¹² "Pour un besoin déterminé, aptitude commune à des éléments, de fabrication ou de conception différentes mais de fonctions identiques, à être substitués les uns avec les autres selon des critères bien définis, sans retouche, modification ou sélection de ces éléments et sans modification des fonctions, des performances ou des matériels de mise en œuvre et de maintenance" (Norme AFNOR NF L 00-0007 ind B).

techniques voulus. L'identification d'un élément change¹³ avec sa définition¹⁴. Aussi la population des éléments peut-elle s'enrichir de nouveaux arrivants nés de l'amélioration technologique de leurs aînés. Un sous-ensemble incorporant des modifications est une nouvelle sélection d'éléments modifiés. Un tel sous-ensemble devient lui-même un élément avec une identification qui le distingue de ses contemporains à moins qu'il ne soit considéré comme totalement interchangeable avec certains d'entre eux. Auquel cas il partagera la même identification. Dans ce formalisme, les exemplaires modifiés, qu'ils soient éléments ou ensemble d'éléments, sont distingués par une nouvelle identification, sauf s'ils sont considérés interchangeables, auquel cas l'identification sera identique et leurs compositions indifférentes. La conquête de l'interchangeabilité s'impose comme un moyen d'éviter la distinction systématique des générations successives d'éléments ou d'ensembles, qui segmente les séries et contrevient à la logique de sériation poursuivie. Mais c'est un moyen radical - sans mémoire de composition - par rapport au principe d'une gestion par rang ou par date consistant à faire l'appoint des modifications affectant un objet. La propagation des impacts d'un train de modifications dans les arborescences est-elle contrôlable avec la notion d'interchangeabilité totale ?

La définition d'un élément, sous-ensemble ou ensemble, englobe en particulier, la liste des éléments qui le compose. Pour en savoir plus, il faut aller consulter la définition de chaque élément constitutif et ainsi de suite. Pour connaître l'antériorité d'un élément modifié, il faut cheminer en sens inverse. Retrouver dans sa composition, l'élément constitutif impacté qui a répercuté l'impact à son tour.



Ainsi, la composition d'un élément, ou encore sa descendance, se découvre par ricochet. Une modification entraîne une nouvelle identification de l'élément et se répercute dans l'arborescence tant que l'interchangeabilité n'est pas retrouvée. Soit un nouvel objet est défini, soit l'interchangeabilité efface à un moment donné toute trace des différences de composition. La complexité de la propagation des impacts d'une modification par voisinage immédiat est

amplifiée par le nombre d'éléments et de liens concernés ainsi que par le nombre et la fréquence des modifications. En pratique, l'étude séquentielle de chaque modification d'un train est impossible. L'exercice est de nature combinatoire et contraint à étudier plus de définitions qu'il n'en faut produire. L'étude simultanée d'un train de modifications est incompatible avec une traçabilité des impacts. Impossible en effet de concéder une interchangeabilité pour une modification si elle est rompue par une autre du même train. Et cela serait dépourvu d'intérêt. Impossible donc de tracer l'origine d'un changement d'identification quand plusieurs modifications l'ont provoqué. De plus, la progression de proche en proche masque les impacts transversaux (sur une autre branche de l'arborescence) et qui ne peuvent être évalués définitivement qu'au niveau des sous-ensembles communs. C'est à dire quand les processus d'analyse sont déjà très avancés impliquant de revenir sur des interchangeabilités concédées trop tôt.

En conclusion, ce formalisme très contraignant n'est adapté qu'à une cadence très modérée de modifications, c'est-à-dire pour une innovation contrôlée. Ici, il importe de bien faire remarquer que, dans une perspective de production en série, l'adoption d'un formalisme donnant aux éléments constitutifs d'un objet, leur autonomie en terme d'identification et d'évolution, implique soit des changements en cascade pour conserver la trace d'une composition modifiée, soit une interchangeabilité totale ne conservant aucune trace de la composition, deux alternatives incompatibles, comme nous venons de le voir, avec des vagues de modifications. Quand sériation nécessaire et innovation intensive se conjuguent, comment sont gérés les vagues de modifications dans le cas d'objets techniques complexes ?

¹³ L'identification étant commune à l'élément et à sa définition, toute modification se répercute physiquement par un marquage des objets, ainsi que sur les documentations associées et partagées par l'ensemble des acteurs.

¹⁴ qui décrit sa composition en éléments et son mode de réalisation à partir de ces éléments (l'élément est l'article d'un ERP, d'une GPAO)

1.3.Option(s) de gestion des configurations multiformes : notion d'interchangeabilité restreinte pour productions sériées soumises à des vagues d'évolutions

Les formalismes que nous avons décrits correspondent soit à des activités multi-unitaires (gestion des configurations et des évolutions par rang et date avec principe d'applicabilité), soit à des activités sériées où les rythmes d'innovation restent contrôlés (mise à jour des arborescences codifiées avec principe d'interchangeabilité). En fait, deux types d'activités ayant en commun une gestion des configurations qui ne soit pas de nature combinatoire. Soit parce que le nombre d'exemplaires est réduit, soit parce le nombre de configurations est maîtrisé. Mais si la complexité des objets techniques laisse tout au plus la possibilité d'étudier une seule configuration incorporant une vague de modifications, qu'il faut de plus réévaluer après chaque vague, le formalisme doit plier à ces contraintes, avec plus de souplesse que les deux précédents. Un tel formalisme est-il une combinaison des précédents ou est-il résolument nouveau ? Quelles transcriptions les PLM permettent-ils pour ces usages hybrides ? Il n'existe aucune correspondance raisonnable entre les deux formalismes décrits jusqu'ici (*applicabilité* vs *interchangeabilité*). Les critères d'applicabilité et d'interchangeabilité n'ont rien à voir entre eux. Le premier est construit sur un rang ou une date variable mais avec un principe d'applicabilité exécutoire. Le second est construit sur une indifférence d'applicabilité à tel rang ou telle date, par principe même d'interchangeabilité, et par conséquent sur une indépendance avec les considérations de rang, date ou applicabilité. Une modification conduisant à une interchangeabilité totale n'a pas lieu d'être appliquée à un rang précis.

Si l'on souhaitait, pour gérer une activité hybride (sériée et fortement évolutive), adopter un usage lui-même hybride, cela impliquerait (à supposer que ce soit possible), la coexistence d'un double formalisme dans l'outil PLM, issue de choix d'options inconciliables et des circuits d'information parallèles entre les différents acteurs. Avec à la clé, un travail en double exemplaire nonobstant les risques de mésinterprétations et d'erreurs. Dans un tel scénario, les PLM sont au reflet des fonctionnements et ne contribuent au mieux qu'à faire partager à l'ensemble des acteurs la double pratique.

L'alternative que nous proposons est un schéma unique construit avec une notion d'interchangeabilité restreinte. Entre deux états de la configuration, l'état initial et l'état final, le principe est de traduire les écarts en repérant les éléments invariants et ceux modifiés. Les éléments invariants se voient attribuer une interchangeabilité restreinte (et non plus totale). Leur identification ne change pas mais un lien les rattache aux deux configurations, initiale et finale. Les éléments modifiés sont identifiés différemment et un lien les rattache à la configuration finale uniquement.

Evolution de l'objet	Identification	Cas d'emploi
Elément invariant	inchangée	configurations initiale et finale
Elément variable	modifiée	configuration finale

Au fil des évolutions de configuration, chaque élément est interchangeable relativement à une suite restreinte de configurations successives. Cette solution évite l'analyse combinatoire de toutes les configurations possibles. C'est bien une interchangeabilité restreinte comparée à une interchangeabilité totale résultant d'une étude combinatoire. Mais évidemment, la seule considération de l'identification des éléments n'est plus suffisante pour assurer la présence simultanée des modifications d'une vague donnée, sans risque de panacher les éléments interchangeables. Il est indispensable de détenir la correspondance avec les configurations d'emplois autorisées (suite de configurations validées).

En septembre¹⁵ 2008, sur un A330, une configuration non conforme d'une des trois installations informatiques de contrôle de vol, a provoqué un atterrissage violent, au point de nécessiter le

¹⁵ Source Air Transport Intelligence news - 29/11/08

remplacement du train principal. Airbus et l'EASA¹⁶ ont alerté les opérateurs de maintenance sur le respect des seules combinaisons autorisées par le constructeur : "To prevent an uncertified configuration that may result in unexpected operation of the aircraft systems owners and operators should adhere to the interchangeability and mixability rules given in Airbus type certificate holder documentation". En 2004, sur un Airbus A340, l'EASA avait signalé un problème identique de contrôle des manœuvres des aérofreins.

Les configurations étudiées et validées donnent les configurations d'emplois autorisées pour les éléments interchangeables et garantissent également la coprésence des éléments modifiés. Inversement, pour un élément donné, les configurations autorisées constituent une classe d'interchangeabilité. Le scénario alternatif unique que nous venons de décrire pour un usage hybride présente de nombreux avantages. Mais la distinction entre interchangeabilité totale et restreinte n'existe pas dans la sémantique gestionnaire des PLM. Ces solutions PLM ne peuvent donc transcrire les usages hybrides donnant naissance aux multiformes, qu'au travers des fonctionnalités proposées, interchangeabilité, rang, date, cas d'emploi, ... avec toutes les difficultés et risques que cela représente.

La vision globale et partagée des informations, permise par un outil homogène et communicant, est d'une grande valeur ajoutée (Merminod, 2007). Mais l'intérêt des solutions PLM sera considérablement réduit tant qu'elles ne proposeront pas des fonctionnalités plus souples de l'interchangeabilité (totale ; restreinte) et tant que les conditions d'un traitement automatisé ne seront pas réunies. Il sera toujours impossible de calculer de manière automatisée le regroupement et la planification des besoins, ou de procéder à la recherche automatisée de l'ensemble des éléments sérialisés devant être remis à jour (retrofits), et de profiter pleinement des économies d'échelles. La survivance de différentes générations d'objets techniques se côtoyant dans les bases de données, les ateliers ou les parcs installés réclamera de les différencier (pour les éléments modifiés) et de les regrouper (pour les éléments invariants). Les PLM se limiteront donc au mieux à présenter des solutions incomplètes ou indécidables aux acteurs désignés, à des fins d'analyses et de décisions, avec un recours à une main d'œuvre coûteuse mobilisée à l'inspection des différences entre prévisionnel et opérations à réaliser réellement sur le terrain, entre éléments disponibles et identifications attendues, ainsi que leur localisation, ou encore au contrôle des écarts de configurations. Sans être nécessairement préjudiciables à la qualité des matériels, les inspections déboucheront dans les mêmes proportions sur des fiches d'anomalies, des dérogations et parfois même de délicates substitutions d'éléments. Il sera toujours aussi délicat de créer une campagne de mise à niveau d'un parc complet de matériels quelles que soient leurs versions respectives, de localiser les éléments ainsi que leur mouvement entre les installations et les magasins, ou de gérer la disponibilité des éléments.

Conclusion de cette première partie :

En définitive, toute population non fermée d'éléments se confronte nécessairement à la question de l'évolution et de l'identification de ses membres, avec ses distinctions et ses homonymes, ses individualités et ses classes d'équivalence. Pour gérer les évolutions de configurations, les outils PLM proposent plusieurs fonctionnalités (rang, date, applicabilité, interchangeabilité, cas d'emploi, ...), qui correspondent aux principaux usages observables dans l'industrie. Le choix des fonctionnalités sous-tend un formalisme qui traduit une option gestionnaire (applicabilité et multi-unitaires ; interchangeabilité et sériation,...). Mais le traitement des multiformes n'est possible qu'au travers de choix hybrides difficiles à concilier en l'absence de notions nouvelles comme l'interchangeabilité restreinte qui n'existent pas dans la sémantique des PLM.

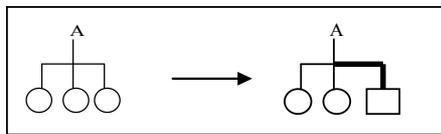
¹⁶ European Aviation Safety Agency

2 Conditions d'un traitement automatisable des multiformes, redéfinition de l'interchangeabilité et ébauche d'une typologie de correspondance entre dynamiques industrielles et formalismes de gestion des évolutions de configuration

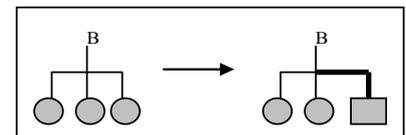
Il n'existe donc pas de traitement automatisable mais nous allons formuler les conditions que nous pensons nécessaires et suffisantes pour que cela devienne possible. Nous redéfinirons la notion d'interchangeabilité afin de nous permettre de décrire de manière plus générale une typologie des correspondances entre certaines dynamiques industrielles et les formalismes qui peuvent leur convenir pour gérer les évolutions de configurations.

2.1 Conditions d'une gestion automatisable des multiformes

Nous avons vu qu'une arborescence d'éléments peut se décrire par des éléments, des sous-ensembles et des ensembles (qui sont eux-mêmes des éléments) reliés entre eux d'une certaine façon¹⁷. Lorsqu'un sous-ensemble A incorpore, sans changer d'identification, des éléments modifiés, il est indispensable de conserver la correspondance entre l'arborescence d'origine et la nouvelle. Un lien existe donc entre le sous-ensemble et chaque élément d'origine. Un autre lien s'ajoute entre le sous-ensemble et chaque nouvel élément modifié. Gérer ces liens par rang et par date a été expliqué. Il s'agit d'activer les premiers liens pour certains exemplaires puis de basculer sur les nouveaux liens pour les exemplaires suivants. Lors du basculement, les liens premiers sont désactivés. La gestion par date est identique, simplement le basculement est inscrit dans le temps. Ces basculements sont programmés (distanciation) pour écarter tout risque de mélange. Mais quand les deux liens coexistent, il s'agit d'un multiforme. Si les deux formes sont totalement interchangeables, il est permis de les choisir indifféremment et la traçabilité des modifications est inutile.

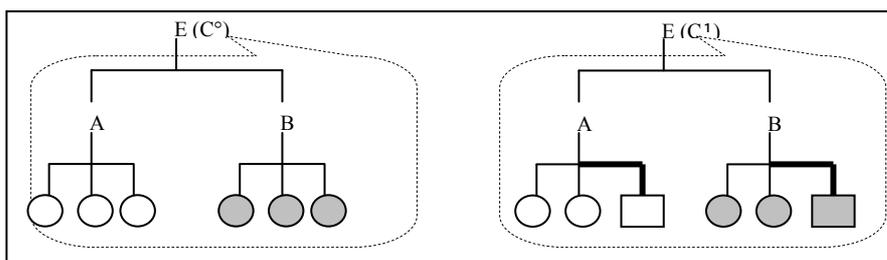


Imaginons un second sous-ensemble B vivant exactement le même scénario que le sous-ensemble A.



Si un ensemble E coiffe les deux sous-ensembles A et B, il y a alors deux cas de figures :

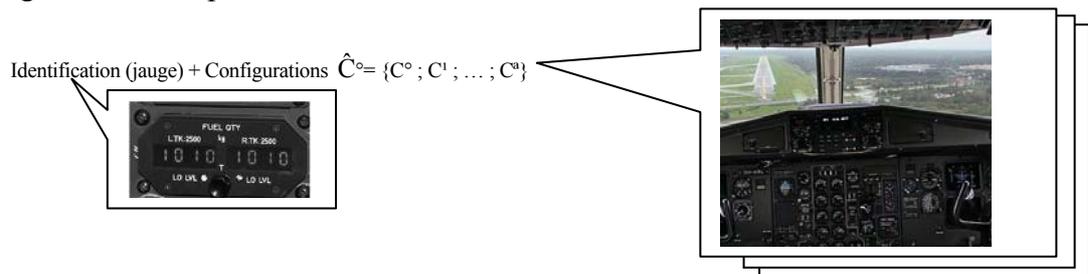
- ❖ toutes les combinaisons entre les formes possibles de A et B sont étudiées pour garantir une totale interchangeabilité. Auquel cas l'ensemble E réunissant A et B conservera toujours la même identification E (et celle-ci sera suffisante). Mais nous avons vu que cette pratique était de nature combinatoire (avec le nombre de liens et d'éléments) et qu'elle est donc en général impraticable.
- ❖ une seule nouvelle combinaison est validée : A (avec le nouvel élément modifié) et B (avec le nouvel élément modifié). L'identification de E est inchangée (mais ne sera plus suffisante). L'interchangeabilité n'est valable qu'entre cette configuration validée et celle d'origine. Nous avons vu dans le cas de l'aéronautique, les exemples illustrant les répercussions induites d'emplois non-conformes (configurations non validées).



¹⁷ La modélisation sous forme d'éléments et de liens arborescents est généralisable avec le langage de la théorie des graphes et plus largement encore dans la théorie des ensembles.

Un élément multiformes est un sous-ensemble ou un ensemble d'éléments, dont l'identification a été conservée alors même que sa composition a changé. Il peut regrouper différentes générations d'éléments dans des configurations autorisées bien déterminées. Pour gérer un élément multiformes, il est nécessaire de gérer simultanément son identification avec ses configurations d'emplois (à savoir la configuration initiale C^0 de l'ensemble E et sa suivante C^1 du même ensemble E). Si l'identification de E avait changé, le problème ne se poserait pas et la gestion des cas d'emploi serait très simple, tout comme d'ailleurs la gestion des variantes et des options. Mais il serait trop coûteux de changer cette identification de E à chaque changement de composant (élément ou sous-ensemble). L'identification de E est donc inchangée et seule la connaissance des configurations C^0 et C^1 permet de distinguer les différentes formes de l'élément multiformes.

Le couple *identification + configurations* est nécessaire et suffisant en information pour désigner la bonne composition en fonction des emplois. L'interchangeabilité restreinte d'un élément s'interprète comme l'ensemble des configurations pour lesquelles l'élément est interchangeable. En conséquence, ces configurations sont toutes, relativement à l'objet considéré, équivalentes et constituent donc une classe d'équivalence. Elles peuvent être représentées par n'importe laquelle d'entre elles, en l'occurrence celle d'origine C^0 . Ainsi, l'identification d'un élément complétée par \hat{C}^0 (représentant la classe d'équivalence) est nécessaire et suffisante. L'intérêt de ce formalisme est d'être entièrement automatisable. L'identification de l'élément résumant sa composition pour une classe de configurations d'emploi. L'ensemble et l'élément réunis dans une dénomination.



Nous avons longuement expliqué que les multiformes ne peuvent être inhibés ou prohibés. Ils doivent être gérés autrement qu'avec des identifications inchangées et une interchangeabilité contrôlée par ailleurs au moyen du concept d'applicabilité (rang, date). Une solution automatisable existe que les PLM n'ont pas prévue.

La problématique de l'interchangeabilité est très complexe et d'une grande généralité. L'industrie aéronautique n'est qu'une illustration. Le National Institute of Standards and Technology (NIST) a estimé à 60 milliards de dollars par an les pertes enregistrées par l'industrie et le commerce américains à cause des bogues contenus dans les logiciels (S&T Press USA- n°324 - sept.2002). D'où l'intérêt pour la gestion des versions et des configurations dans ces domaines du génie logiciel et des bases de données (Bellagio, Milligan, 2005 ; Stark, 2004 ; Djeddar, 2003 ; Gollac et al., 1998 ; Sacquet, Nowencien, 1995 ; Ghoul, 1983). "The more complex the digital resource, the greater the potential loss is likely to be. For example, interchanging the data held in geographical information system (GIS) databases and groupware databases could involve the loss of thousands of links that have taken years of effort to create and which represent the bulk of the value of the database" (Feeney, 1999). "One of the things that I was asked to mention (...) is the issues surrounding multiple and cumulative impacts. Again, this is a very difficult area. My colleague, Gordon Walker, and Carolyn Stephens recently completed a study for the Environment Agency in the UK that reviewed this whole area. Quite simply, there are no standard definitions of cumulative or multiple impacts. There are no standard approaches and the terms often tend to be interchangeable. It is a very difficult thing to deal with. In the United States, Krieg & Faber (2004) was one of the few studies which tried to deal with multiple

impacts and stated quite clearly that most failed to deal with this issue primarily because of data availability issues. This is therefore still an area where there is an enormous amount of work to be done.” (Fairburn, 2008). Retour donc sur cette notion d’interchangeabilité que nous allons nous efforcer de redéfinir.

2.2 Reconcevoir l’interchangeabilité

Si l’on se réfère au Larousse, la première occurrence de l’interchangeabilité apparaît en 1931 pour caractériser les pièces standardisées, fabriquées en séries. L’adjectif interchangeable lui est antérieur, 1870 en France, 1450 en Angleterre. Il est employé pour les pièces et objets semblables, de même destination, et qui peuvent être changés l’un pour l’autre ou mis à la place les uns des autres (pneus interchangeables, mécanismes à pièces interchangeables,...).

L’interchangeabilité a toujours été vue comme une difficulté purement technique, souvent indéchiffrable sur le plan gestionnaire. Mais nous avons vu qu’elle pouvait être totale ou restreinte. Précisons de plus, qu’il n’existe aucun référentiel où l’interchangeabilité a un statut variable. Parce que l’interchangeabilité variable est contre nature, paradoxale et difficilement concevable pour une gestion industrielle orthodoxe. On peut expliquer cette inconcevabilité. Le mot *interchangeabilité* colle à l’idée d’une *interchangeabilité totale*. Penser l’*interchangeabilité* autrement est une reconception (Hatchuel, Weil, 2008) profonde des mutations des objets techniques. Cela revient à dissocier le concept d’*interchangeabilité* de la seule propriété qu’on ait su lui octroyer : être *totale*. Il est alors possible de généraliser ce concept pour en étudier de nouvelles propriétés. Cette méthode¹⁸ nous permet de concevoir une *interchangeabilité* qui ne soit plus *totale* mais *restreinte* (jusqu’à être en mesure de l’exhiber).

Toute *interchangeabilité* est en fait relative à un état des connaissances sur les éléments, les objets et leur environnement (champ, usage,...). Aucune *interchangeabilité* fût-elle qualifiée de *totale*, ne peut pas être entendue dans une dimension intemporelle. L’interchangeabilité est toujours quelque part conditionnelle (au sens : sachant que...). Les PLM modélisent les connaissances, les processus et les objets. Ces considérations devraient pouvoir y trouver un lieu d’expression approprié.

L’interchangeabilité naît de la nécessité d’équivalence entre deux entités. Elle dépend des liens¹⁹ que les entités considérées entretiennent entre elles et avec leur environnement. On peut distinguer deux espèces d’interchangeabilité : l’élément est invariant et l’objet change (première espèce), l’élément est alors commun à plusieurs produits ou générations de produits (Cf. la jauge de carburant des ATR) ; l’élément change et l’objet est invariant (deuxième espèce). Ces deux espèces d’interchangeabilité ont chacune leur traduction en termes de cas d’emploi :

- ❖ emploi d’éléments identiques sur des objets de conception ou de fabrication différente, pour l’interchangeabilité de première espèce.
- ❖ emploi d’éléments de conception ou de fabrication différente, sur des objets identiques, pour l’interchangeabilité de seconde espèce.

Elles ont aussi chacune leur traduction industrielle et leur histoire. Première moitié du XV^e siècle, l’imprimerie associe la presse à imprimer²⁰, mise au point d’après le modèle des pressoirs à vis, et les caractères métalliques mobiles²¹. L’imprimerie (Chapell, 1970 ; McMurtie, 1942) est

¹⁸ Cette méthode dénommée *forcing* a été imaginée par le mathématicien américain Paul Joseph Cohen (1934-2007).

¹⁹ Ces liens peuvent traduire une nomenclature d’assemblage, les fonctions que l’objet remplit au sein du système ou plus largement les moyens techniques conçus conjointement et/ou employés pour sa conception et sa réalisation.

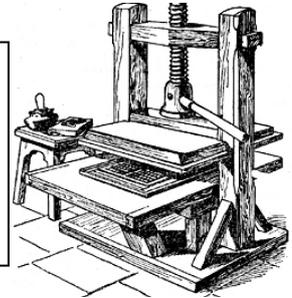
²⁰ Qui existait déjà avec « le presse » pour la gravure sur bois (xylogravure)

²¹ Qui existaient au moins depuis le XI^e siècle (vraisemblablement dès le II^e) en plomb, puis en cuivre - Bi Sheng (1041-1048).

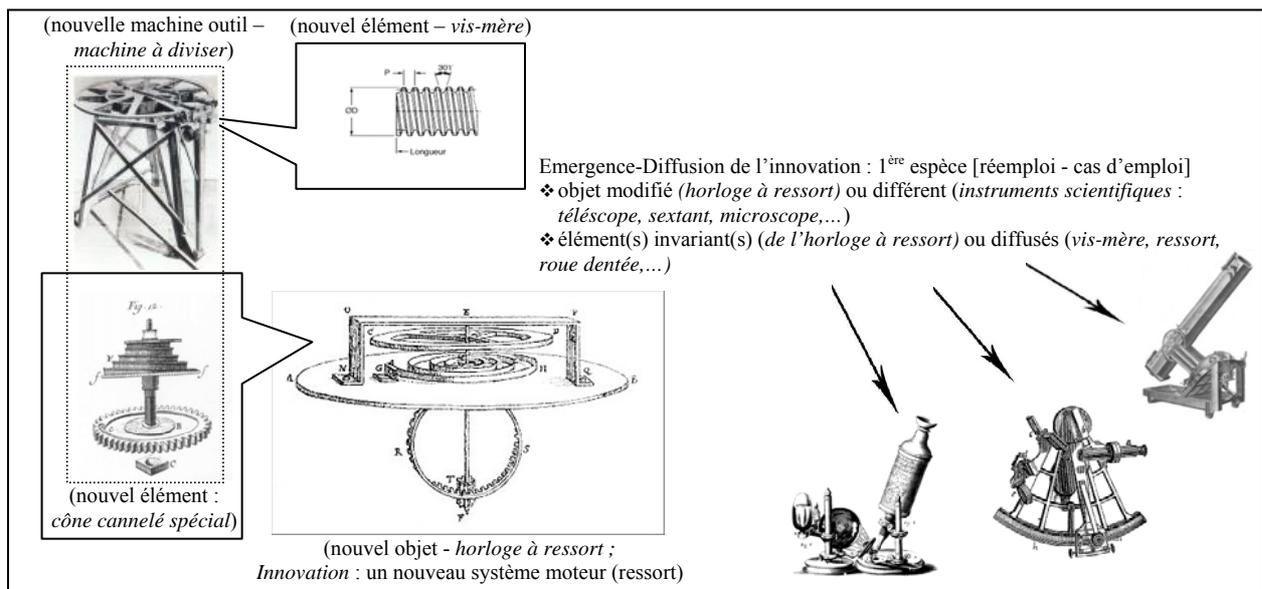
essentiellement un perfectionnement inspiré d'autres²² inventions de l'époque notamment dans le domaine de la métallurgie (fabrication des poinçons ; jets en moules). L'avancée décisive de Gutenberg²³ (Updike, 1920 ; Scholderer, 1970 ; Lehmann-Haupt, 1966) est la lettre métallique moulée et réutilisable (les *types*) qui seule répond à l'exigence d'une impression sans "fouillage". Il faut, pour compenser les irrégularités du moulage (Bertrand, 1787), exercer une forte pression qui marque le verso du papier et en interdit l'impression. Les *types* solutionnent une problématique d'interchangeabilité de seconde espèce : la standardisation des éditions²⁴ imprimées.

La méthode de fabrication des caractères moulés :

- *gravure* en poinçon à l'extrémité d'une tige métallique en acier doux, du signe voulu en relief et à l'envers
- *frappe* à l'aide de ce poinçon d'une matrice dans un métal plus tendre (cuivre rouge)
- *moulage* (reproduction), dans un moule à arçon (à main), d'un alliage ternaire (plomb, étain, antimoine)
- *disposition* (mots, phrases, pages,...) des *types* sur un socle en les mettant à l'envers
- *disposition* d'une feuille de papier dessus
- *compression* forte d'une platine sur un bloc d'impression parfaitement plan
- *impression* de pages recto verso et reproduction à l'identique.



Fin XV^e et XVI^e siècle, l'horlogerie (Howse, 1980) adopte un nouveau système moteur, la force élastique du ressort, en remplacement d'un poids suspendu à une poulie. L'instrument horaire peut ainsi devenir portatif. Cette innovation soulève la question du réemploi des autres éléments demeurés invariants (interchangeabilité de première espèce). Pour compenser les variations de force du ressort, l'horloge utilise un cône cannelé spécial nommé *fusée* dont le pas de vis est difficile à faire à la main. La taille à la main ne permet ni espacements précis ni découpages nets. J. Ramsden²⁵ (1735-1800) élabore un tour permettant d'obtenir la vis-mère (vis de contrôle) nécessaire à sa *machine à diviser*²⁶ (Ramsden, 1787) de haute précision, réutilisée pour nombre d'instruments scientifiques : sextant, baromètre, microscope, télescope,... L'horloge est le premier appareil de mesure moderne et les horlogers sont les premiers fabricants d'instruments scientifiques. Ils fondent²⁷ la technologie des machines outils, en particulier dans trois domaines : la roue dentée, le ressort et la vis. La question des cas d'emploi de ces éléments sur des produits différents est celle de l'interchangeabilité de première espèce. L'horlogerie devient ainsi "mère" des machines, déclouonnant les divers champs de connaissance et de savoir-faire.



²² Dont le papier (qui apparaît en Chine au début du II^e siècle) et l'encre permettant l'impression des deux faces du papier.

²³ Orfèvre de formation.

²⁴ La première est le Psautier de Mayence (1457). Les éditions sont du reste hybrides, imprimées et manuscrites.

²⁵ Mécanicien de précision inspiré de la technique des premiers horlogers français (Lenoir ; machine à fusée ; 1741).

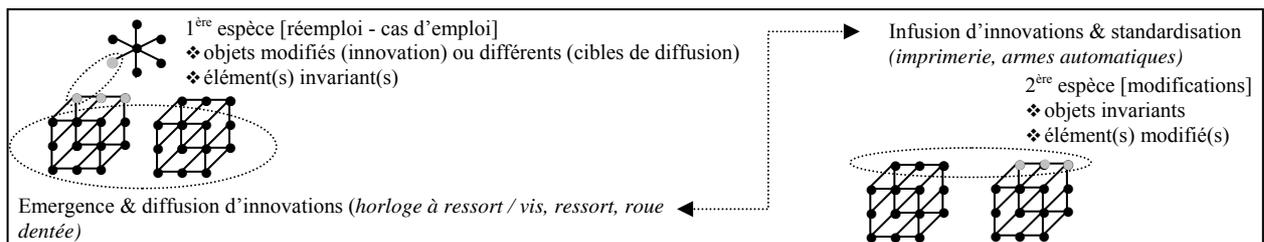
²⁶ Machine à diviser les instruments de mathématiques

²⁷ La première machine à découper les rouages est l'œuvre de J.Torriano (1540) pour construire une grande horloge astronomique (20 ans de mise au point, 1800 rouages, et 3,5 ans de réalisation).

L'imprimerie et l'horlogerie ont en commun le passage de productions manuelles (manuscrit ; taille manuelle des rouages) à des productions (partiellement) automatisées (caractères mobiles moulés ; machine à diviser). Les avancées technologiques (vis, ressort, roue dentée) issues de l'horlogerie se diffusent aux instruments scientifiques. L'imprimerie accueille et perfectionne des avancées technologiques (poinçon ; moule) issues de la métallurgie.

En corollaire, l'interchangeabilité traduit la capacité d'absorption des innovations : en émergence et diffusion (première espèce) / en infusion²⁸ et standardisation (seconde espèce).

Dans le courant du XIXème siècle, de nombreuses mutations industrielles sont marquées par l'infusion d'innovations technologiques et la standardisation (Cohen, 1994) des techniques et des méthodes. C'est le cas des usines d'armement²⁹ en 1830 en prise avec des problèmes d'ajustage visant à conserver la précision et la qualité des armes, quels que soit les matériaux (bois ; métal) ou les procédés utilisés pour la fabrication des divers composants. Il s'agit bien d'une interchangeabilité de seconde espèce (éléments de conception ou de fabrication différente sur des objets identiques). Tandis que l'émergence des innovations et leur diffusion relèvent d'une interchangeabilité de première espèce. D'où la nécessité³⁰ de distinguer les éléments et les objets demeurés respectivement invariants ou considérés comme tels (interchangeabilités de première et seconde espèce). En somme, la sériation exige une stabilisation technologique que remet en cause l'innovation. Le schéma ci-dessous décrit les processus d'évolution des objets suivant que l'on considère les éléments impactés (nous parlons alors d'interchangeabilité de seconde espèce) ou les éléments invariants (nous parlons alors d'interchangeabilité de première espèce).



Qu'il s'agisse des caractères mobiles et interchangeables pour imprimer les pages d'un livre, de composants interchangeables pour armes de précisions, de moteurs électriques interchangeables entre deux machines différentes, ou des roues dentées interchangeables entre une horloge et un microscope, la rupture d'interchangeabilité marque la fin d'une reproduction d'objets identiques ou transposables. Avec pour conséquences indésirables une diversification, une segmentation des séries et une crise potentielle du formalisme gestionnaire (Hatchuel, Sardas, 1992).

Comment prévenir ces ruptures d'interchangeabilité qui peuvent modifier le visage de l'activité et rendre inapte un formalisme gestionnaire ? Comment à dessein, concevoir les objets en anticipant leur renouvellement pour éviter qu'il ne s'emballe sous l'effet de l'innovation ?

Nous allons ébaucher les principes d'une typologie pour tenter de répondre à ces questions.

2.3 Dynamique industrielle et formalismes de gestion des évolutions de configurations : principes d'une typologie de correspondance

²⁸ Nous préférons le terme d'infusion (par opposition au terme de diffusion) pour traduire l'absorption par un milieu, d'une innovation de source externe (exogène).

²⁹ 1830, usines *United States Army's Armory* de Springfield, Massachusetts, fournissant en série des armes légères au gouvernement fédéral.

³⁰ C'est une condition nécessaire pour sérier. Les constructions de machines électriques de la Société *Brown-Boveri* à Baden en Suisse (Dalémont J. 1907), en série et à la commande, ont été confrontées à un problème d'interchangeabilité jugé trop complexe par les ingénieurs de l'époque au point d'opter pour une distinction des fabrications.

Nous devons d'abord dégager les principes fondamentaux qui gouvernent la gestion des évolutions de configuration. Comment innovation, conception et production interagissent-elles ?

2.3.1 Deux principes génériques pour préserver la sériation et absorber l'innovation

Il n'y a pas une seule façon de modéliser la définition d'un objet qui se compose de plusieurs éléments. Une définition d'ensemble de l'objet, sans définition autonome de chacun de ses éléments, peut convenir à condition que cette définition soit figée. En revanche, comme nous l'avons vu, si la définition change, parce qu'un élément au moins évolue, un problème va se poser pour reproduire l'objet en série, parce que les éléments invariants et les éléments modifiés sont totalement solidarisés dans une définition monolithique. Il sera opportun de décomposer la définition d'ensemble pour que chaque élément constitutif ait sa propre définition, de sorte qu'il puisse évoluer de manière autonome. Il est nécessaire que les éléments variables puissent être séparés et distingués des éléments invariants. La séparabilité d'un élément consiste à lui donner une existence autonome (identification propre, définition et reproduction autonomes).

✦ 1^{er} principe de préservation de la sériation : séparabilité des éléments variables

Ce principe garantit qu'un formalisme de gestion des évolutions de configuration soit bien adapté à une dynamique industrielle donnée. Un formalisme sans séparabilité des éléments variables ne permet pas de reproduire les éléments invariants en réalisant des économies d'échelle³¹ et donc de fabriquer en série. C'est pour cela qu'il conviendra à des productions multi-unitaires (gestion par applicabilité) mais pas à des productions sériées. Ce principe permet aussi de limiter la segmentation des séries dans une économie de variété.

La subdivision des objets et des éléments eux-mêmes, suivant cette logique nécessairement relative à un état donné des connaissances, peut être qualifiée d'*expansive*. Elle se manifeste par exemple dans la conception des systèmes logiciel/matériel, par le partitionnement matériel³² (invariant)/logiciel³³ (variable) avec une décomposition multi-couches. Ou encore, dans la séparation entre la conception des couches de communication et les parties matérielles et logicielles (Rousseau, 2005). Sur le plan formel, une analogie est possible avec la théorie des ensembles, qui permet notamment d'éviter, pour l'identité des objets et des éléments générés, toute contradiction³⁴ (Russel B., 1907) liée à la notion d'ensemble de tous les ensembles.

Les propriétés et l'usage d'un élément, d'un sous-ensemble ou d'un objet, dépendent de leur évolution mais aussi de leurs relations avec les autres éléments, sous-ensembles et ensembles qui font leur environnement. La question de leur invariance est celle de leur interchangeabilité et peut se poser de deux façons :

- ✦ comment reconnaître (et identifier en conséquence) les éléments (ou sous-ensembles) demeurant interchangeables malgré les évolutions internes (seconde espèce), c'est à dire laissant invariants tous les autres éléments de leur environnement lorsqu'ils sont combinés avec eux (relation fonctionnelle,...) ?

³¹ voir le second principe plus loin.

³² Processeurs, composants spécifiques, mémoire, réseau de communication complexe,...

³³ Pilotes, interruptions, gestion des ressources, interfaces logiciel/matériel, logiciels de l'application,...

³⁴ L'ensemble de tous les ensembles qui ne sont pas éléments d'eux-mêmes est-il élément de lui-même ? Un barbier se propose de raser tous les hommes qui ne se rasent pas eux-mêmes, et seulement ceux-là. Le barbier doit-il se raser lui-même ? L'étude des deux possibilités conduit à une contradiction. De telles contradictions sont évitées :

✦ par adjonction de nouveaux axiomes (en affirmant qu'un tel barbier ne peut exister).

✦ par la restriction du principe de compréhension (Zermelo, 1908) : le processus ne définit pas un nouvel ensemble mais sépare, dans un ensemble déjà donné, les éléments qui ont une certaine propriété (qui constituent un sous-ensemble). En corollaire, toute entité est potentiellement considérée comme un ensemble.

✦ La théorie des types (Whitehead, Russell, 1910) : les ensembles sont de types hiérarchisés. À un ensemble ne peuvent appartenir que des éléments, qui peuvent être des ensembles, mais sont de types strictement inférieurs au type de l'ensemble initial.

- ❖ comment reconnaître (et identifier en conséquence) les éléments (ou sous-ensembles) demeurant interchangeables malgré les évolutions leur environnement (première espèce), c'est à dire ceux que tous les autres éléments de leur environnement laissent invariants lorsqu'ils sont combinés avec eux (relation fonctionnelle,...) ?

L'invariance comme l'interchangeabilité ne sont pas absolues mais relatives. Elles dépendent de la combinatoire des liens entre un élément ou un objet et son environnement. Ce qui explique la restriction de la notion d'interchangeabilité aux seules configurations étudiées et validées qu'il convient par conséquent de rappeler au niveau de l'identification des éléments et des objets.

Pour absorber l'innovation, d'un point de vue gestionnaire, il faut ainsi pouvoir reconnaître et identifier les éléments (et sous-ensembles) interchangeables³⁵ afin de pouvoir préserver les éléments (et sous-ensembles) invariants. Cela peut s'énoncer comme principe :

❖ 2^{ème} principe : reconnaissance des éléments interchangeables et préservation des éléments invariants

Ce principe explique, en corollaire, que pour pouvoir regrouper (commonaliser dit-on dans l'automobile) les éléments (ou sous-ensembles) invariants, soit entre les générations successives d'un même objet, soit entre des objets n'ayant à l'origine aucun lien de parenté mais ayant incorporé au cours de leur cycle de vie, des éléments (ou sous-ensembles) identiques (souvent après diffusion d'une innovation), il faut pouvoir reconnaître et identifier les éléments (ou sous-ensembles) interchangeables relativement aux environnements considérés.

Dans l'industrie, les articles sont habituellement codifiés (de manière normalisée d'ailleurs) en fonction notamment des familles d'appartenance et des exigences de traçabilité interne. Ce type d'identification, de même que les règles d'évolution, ne permettent pas toujours, nous l'avons vu, de maintenir la correspondance entre la composition des objets et les environnements pouvant les accueillir. C'est d'ailleurs tout la difficulté de l'identité d'un objet, à savoir « sa qualité d'être bien celui qu'il prétend être » et « qu'une chose est la même qu'une autre » (Littré, 1976), pour un observateur et pour un référentiel. Nous proposons en définitive d'identifier les objets, sous une expression un peu plus générale³⁶ que celle déjà avancée en 2.1, tenant compte des configurations de composition possibles (considérées comme interchangeables) et des configurations garantissant leur interchangeabilité.

Les deux principes que nous avons énoncés, respectivement relatifs à la préservation de la sériation et à l'absorption de l'innovation, sont sans doute plus faciles à admettre qu'à respecter. C'est à la fois la mémoire et le devenir d'un objet qui fait son identité. Préserver les éléments invariants peut changer avec les observateurs et avec les référentiels. Ce qui fait considérer l'interchangeabilité comme totale ou restreinte pour un état de l'art et des connaissances (Simon, 1976). L'interchangeabilité est toujours relative et conditionnelle. Quant à la séparabilité des éléments variables, elle n'est pas toujours prévisible et suppose donc d'agir a posteriori. Rien n'est statique dans ce décor. L'intervention (et donc l'organisation) humaine (Hussenot, 2007)

³⁵ En mathématiques, dans un ensemble et pour une loi de composition interne, les éléments laissant invariants tous les autres éléments sont appelés éléments *neutres*. Un raisonnement analogue est tenu avec l'interchangeabilité. Il s'agit cependant d'un principe de *neutralité variable*, totale (pour un ensemble) ou restreinte (à une collection d'ensembles donnés). Il semblerait intéressant d'explorer les modélisations possibles à partir de ce principe et de la théorie des ensembles, dans la cadre d'une autre communication.

³⁶ Les compositions sont autant de sous-ensembles possibles et les configurations d'emploi sont autant d'ensembles possibles. Pour pouvoir représenter ces deux ensembles d'ensembles correctement, il faut respecter un certain formalisme mathématique. Un ensemble peut être vu comme une collection d'éléments, mais aussi comme un élément mathématique pouvant lui même appartenir à un autre ensemble. Une classe est aussi une collection d'éléments mais qui ne forme pas nécessairement un ensemble. Par exemple une classe propre est une classe qui n'est pas elle-même élément d'une autre classe. La notion de classe généralise celle d'ensemble. Dans le cas d'objets décrits sous forme de relations entre éléments (graphe), une classe d'équivalence est un ensemble. Il est ainsi possible d'identifier un objet en identifiant la classe des compositions (par exemple \hat{C}) et en identifiant la classe des configurations d'emplois (par exemple \hat{E}) : l'objet serait alors identifié par $(\hat{C}-\hat{E})$.

est indispensable pour ajuster (Carbonel, 2001 ; Patout, 2001), en permanence les outils, les formalismes et l'activité. De nombreux travaux (Chandler, 1962, 1977 ; Woodward, 1965 ; Perrow, 1967 ; Aubert, 1994) ont en effet mis à jour le rapport des organisations avec leur environnement. L'innovation agit comme un facteur de contingence sur l'appareil gestionnaire et sur l'organisation qui le fait vivre (Lawrence, Lorsch, 1967 ; Hatchuel, Weil, 1992 ; Hatchuel, Weil, Le Masson, 2002 ; Bourdon, Lehmann-Ortega, 2007).

2.3.2 Essai de formalisation de l'évolution d'une population d'éléments configurant des objets sous l'effet d'une dynamique d'innovation

L'identité d'un objet, telle que nous la proposons (second principe), n'est pas définie indépendamment de la vie de l'objet, mais au contraire d'après ses configurations de composition et d'emplois, résultant respectivement des évolutions internes et environnementales. Comme il n'est pas toujours possible de savoir à l'avance quels seront les futurs emplois d'un objet, ni de conserver la mémoire³⁷ de toutes ses compositions passées, seule résiste la solution d'une identité relative aux compatibilités croisées compositions/emplois. Pour ces raisons, il est donc impossible de considérer une interchangeabilité totale et intemporelle. Le cas des transplantations d'organes est une bonne illustration (Marques-Vidal, Rodondi et Al., 2008).

Dans les limites d'un état donné des connaissances et d'un environnement de production³⁸ avec sa dynamique d'innovation ambiante, nous allons nous efforcer de décrire, le plus formellement possible, la variation d'une population d'éléments et de sous-ensembles configurant des objets pour des propriétés et des usages donnés.

Rappelons d'abord que la *cadence* C est le nombre d'objets produits par unité de temps Ut et qu'en conséquence Ut/C est le temps séparant l'existence de deux objets. Rappelons que de la même façon, la *fréquence* fm est le nombre de vagues de modifications par unité de temps Ut , et qu'en conséquence Ut/fm est le temps séparant deux vagues de modifications. On peut comprendre facilement que plus fm est grand devant C (grande *fréquence* d'évolution pour des objets de petites séries), plus Ut/fm est petit devant Ut/C . Ce qui signifie qu'un nombre grandissant de vagues de modifications surviendront dans l'espace de temps qui sépare la présence du premier objet et l'arrivée du deuxième. Le scénario inverse se décline comme suit : si fm est petit devant C (une *fréquence* d'évolution faible par rapport à la *cadence* de production), Ut/fm est grand devant Ut/C et par conséquent un nombre grandissant d'objets est en production lorsqu'une vague de modifications survient.

Supposons que l'on décrive une population d'objets reproduits à l'identique et coexistants³⁹, comme un ensemble⁴⁰ de ne éléments ou sous-ensembles au reflet d'une structure relationnelle (d'assemblage par exemple, graphe,...). En toute rigueur, il nous faudrait distinguer les statuts d'éléments et de sous-ensembles mais pour des commodités de rédaction et d'écriture nous marquerons simplement les éléments d'un astérisque (éléments*) lorsqu'ils recouvrent les deux possibilités de statuts. Le nombre ne d'éléments* de cette population dépend du *cycle*⁴¹ de vie L des objets et de la *cadence* C de production : $ne=LxC$.

³⁷ Cela nécessiterait de différencier les objets à la moindre évolution d'un élément (gestion impossible).

³⁸ Il est possible de considérer qu'il s'agisse d'une production matérielle ou immatérielle, d'objets, ou de définitions d'objets, ou de connaissances,...

³⁹ C'est généralement le cas sauf pour les objets et les éléments à durée de vie courte, par exemple à usage unique, ou sans maintenance.

⁴⁰ englobant les éventuels nouveaux éléments générés en vertu du premier principe de séparabilité des éléments variables.

⁴¹ Il est aussi possible de ne considérer que la durée de vie des objets au sein du système de production. Dans ce cas, L est égal à Lp le cycle de production.

Si cette population d'éléments* est impactée par des vagues⁴² de modifications qui se succèdent avec une fréquence fm , le nombre cumulé de modifications est $nm = fm \times L$. On peut caractériser l'amplitude de ces vagues de modifications par le nombre ni des éléments* de la population impactés directement ou indirectement par les nm modifications ($nm \leq ni$).

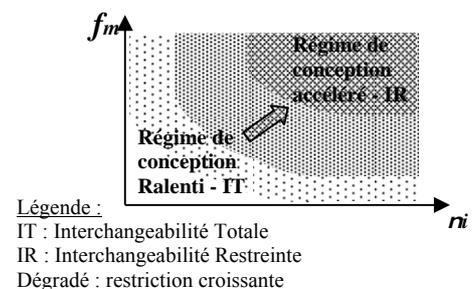
$ne - ni$ est le nombre d'éléments* interchangeables en première espèce (non impactés). Parmi les ni éléments impactés, seul un certain nombre sont interchangeables en seconde espèce. On peut dire que la population se renouvelle en due proportion des éléments* non interchangeables.

En somme, la conjugaison des facteurs liés à l'innovation ($ni ; fm$) avec les facteurs liés à la sériation ($C ; L$), fait la complexité gestionnaire et les risques combinatoires, par conséquent la bonne tenue des formalismes gestionnaires. On retrouve bien certaines situations, multi-unitaires (nombre d'exemplaires réduit) ou sériées (innovation contrôlée), décrites en première partie, qui génèrent une variété de configurations maîtrisable avec les formalismes correspondants {rang, date applicabilité} et {mise à jour des nomenclatures, interchangeabilité totale}. Ces mêmes formalismes se révélant inaptes à gérer des multiformes dans un contexte d'augmentation des cadences vivant des évolutions de configuration trop nombreuses et trop fréquentes. D'où l'accroissement des risques ou la multiplication des coûts et l'allongement des délais.

Plus le taux de renouvellement de la population des éléments* est petit, plus la capacité d'absorption⁴³ de l'innovation est importante et moins la sériation est contrariée. Au contraire, pour un taux de renouvellement élevé et une faible capacité d'absorption de l'innovation, il devient impossible de préserver une interchangeabilité totale (second principe). D'où l'intérêt d'une interchangeabilité restreinte aux seules configurations étudiées et validées et d'une nouvelle identification des éléments* et des objets telle que nous l'avons proposée.

2.3.3 Ebauche de typologie croisant régime de conception et régime de production

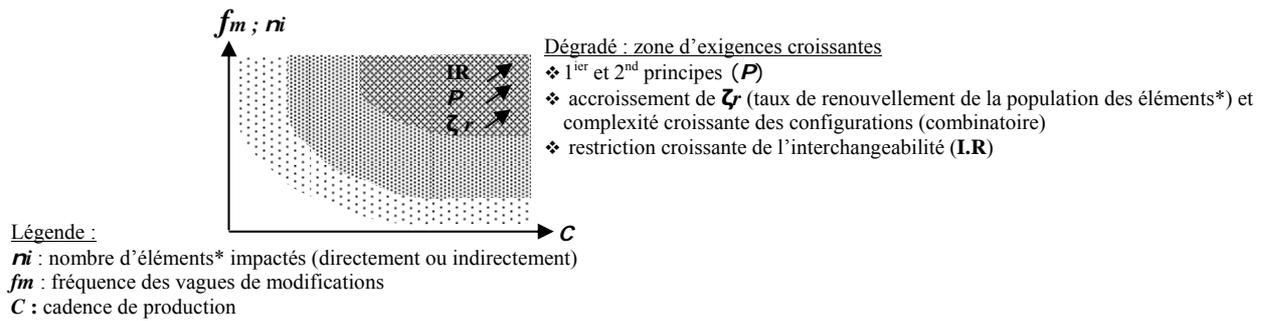
Nous proposons dans le schéma ci-contre une représentation de la variation de l'interchangeabilité (capacité d'absorption de l'innovation) en fonction de la fréquence fm et de l'amplitude ni des modifications. L'interchangeabilité totale, correspondant à un régime de conception ralenti, devient progressivement restreinte pour correspondre à un régime de conception accéléré. Précisons que ni et fm peuvent évoluer dans le temps.



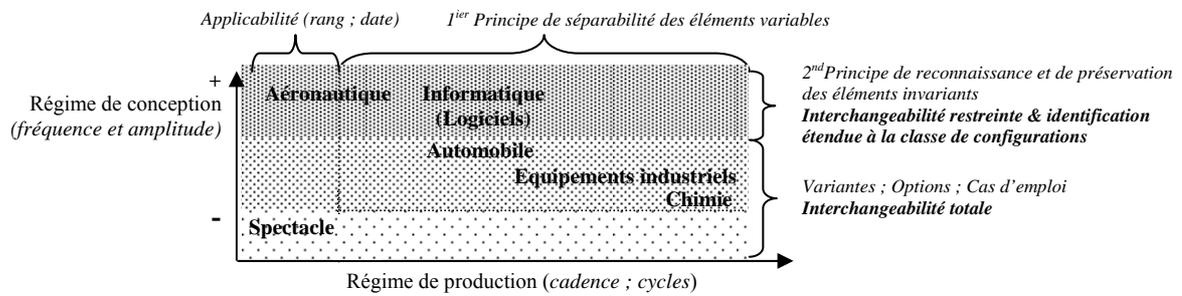
Si nous retenons la diagonale du schéma précédent pour caractériser, avec un seul axe, le régime de conception ($fm; ni$), nous pouvons ensuite le croiser avec un second axe caractérisant le régime de production (C). Lorsque les deux régimes s'accélèrent, l'interchangeabilité restreinte s'impose, ainsi que les deux principes *séparabilité des éléments variables* et *reconnaissance des éléments interchangeables et préservation des éléments invariants*. A défaut, il se produit une segmentation des séries, une explosion de la variété, un accroissement du taux de renouvellement des éléments* et une complexité croissante des configurations.

⁴² Les vagues de modifications proviennent essentiellement des améliorations (qualité, productivité,...) et des innovations. Leur fréquence n'est pas nécessairement constante dans le temps.

⁴³ La proportion d'éléments interchangeables



Le schéma ci-après est déjà une ébauche de typologie avec quelques exemples d'activité industrielle : il croise toujours les régimes de conception et de production comme le précédent schéma, mais se veut plus précis en ce qui concerne les zones de dominance des principaux formalismes de gestion des évolutions de configurations (applicabilité, interchangeabilité, cas d'emploi, variantes et options,...) ainsi que des principes de *séparabilité des éléments variables* et *reconnaissance des éléments interchangeables et préservation des éléments invariants*.



Cette typologie nous permet de repérer quel formalisme peut convenir en fonction des régimes de conception et de production :

- ❖ Un formalisme basé sur le principe d'applicabilité (rang ; date) convient à un régime de conception accéléré à condition que le régime de production soit lent (cadence peu élevée).
- ❖ Un formalisme basé sur les principes d'interchangeabilité totale, avec variantes et options, ne résiste pas si le régime de conception s'emballa.
- ❖ Le principe de séparabilité des éléments variables s'impose avec l'augmentation des cadences (comme d'ailleurs avec les besoins en maintenance mais elles ne figurent pas dans la typologie).
- ❖ On remarque que ce principe de séparabilité n'est pas nécessaire si le régime de conception est faible.

Conclusion

Dans cette communication nous nous sommes attaqués au problème de la gestion des évolutions des données techniques dans les contextes de sériation et de forte évolutivité des objets ainsi que des systèmes de connaissances associés.

Nous avons montré que la problématique de la gestion des impacts multiples et cumulés sur les configurations pose des difficultés conceptuelles et pratiques qui ne peuvent être solutionnées en conjuguant les fonctionnalités offertes par les Product Lifecycle Management (P.L.M).

Nous avons proposé une méthode automatisable de traitement de ces problématiques au travers d'un concept d'interchangeabilité restreinte, relative et conditionnelle, et d'une dénomination des objets permettant d'identifier leur composition en fonction des configurations d'emplois.

Nous avons également ébauché une typologie et des principes généraux pour mettre en correspondance les formalismes possibles de gestion des évolutions de configuration en fonction des situations industrielles génériques conjuguant de manière variable innovation et sériation.

Ce travail mériterait bien entendu d'être prolongé dans plusieurs voies, dont en particulier :

- ❖ Celle de la mise en œuvre instrumentale de la méthode proposée. Nous avons déjà bien avancé sur cette voie sur un terrain de l'industrie spatiale notamment (Giacomoni, 2002 ; Hatchuel et Al., 1994). Cette expérimentation a permis de valider les concepts ainsi que leur implémentation informatique opérationnelle. Il resterait à travailler avec ou à partir des P.L.M actuels (les principales solutions du marché ont été examinées) pour étudier comment cette méthode pourrait s'intégrer à l'offre de fonctionnalité et sans doute aussi avancer dans une démarche de choix et d'articulation des différentes fonctionnalités.
- ❖ Celle de la réflexion et de l'expérimentation de la mise en œuvre de la démarche, du point de vue des enjeux organisationnels. Toute modélisation intégrée à un système d'information ne vaut qu'en fonction des compétences et des besoins des utilisateurs, qui sont ici multiples. Il nous faut distinguer deux catégories d'acteurs :
 - les administrateurs des données techniques, experts qui paramètrent le système à partir des fonctionnalités offertes. Il faut s'assurer que ces fonctionnalités correspondent non seulement à leurs besoins mais également à leurs modes de raisonnement, quitte à ce que ces derniers puissent évoluer dans le cadre de formations à de nouvelles démarches.
 - les différents acteurs opérationnels, concepteurs, fabricants, ... qui doivent s'approprier la logique d'ensemble ainsi que les principes de modélisation sous-jacents, pour interpréter correctement leur rôle de pourvoyeur d'information et de validation des résultats produits par le système.

Ainsi au total, on pourrait avancer sur les enjeux de concrétisation sur les plans instrumental et organisationnel, en gardant bien à l'esprit que l'automatisation bien pensée doit faire une place adéquate aux experts tant pour le design des applications que pour la maîtrise de leur fonctionnement.

BIBLIOGRAPHIE

- Aubert B., Rivard S., Patry M., (1994), "L'impartition des activités informatiques au Canada : Portrait de 640 grandes entreprises", *Cahier du GréSI*,
- Bellagio D. E., Milligan T. J., (2005), *Software Configuration Management Strategies and IBM*
- Benbya H., Meissonier R., (2007), "La contribution des Systèmes de Gestion des Connaissances au développement de nouveaux produits: étude de cas d'une entreprise du secteur de l'industrie aéronautique". *Systèmes d'Information et Management*, Vol. 12, No 1,
- Bertrand J.E., (1787), *Descriptions des arts et métiers, faites ou approuvées par Messieurs de l'Académie Royale des sciences de Paris. Avec figures en taille-douce*. Nouvelle édition, tome XV, Neuchâtel,
- Bourdon I., Lehmann-Ortega L., (2007), "Systèmes d'information et innovation stratégique: une étude de cas", *Systèmes d'Information et Management*, Vol. 12, No 1,
- Carbonel M., (2001), "Dérives organisationnelles dans les projets ERP : les cas de Guerbet et Gaumont", *Systèmes d'Information et Management*, Vol. 6, No 1,
- Chandler, A.D. Jr., (1977), *The Visible Hand: The Managerial Revolution in American Business*, Cambridge, Harvard University Press.
- Chapell W., (1970), *A Short History of the Printed World*, Hartley & Marks Publishers Inc., Canada,
- Cohen Y., (1994), "Inventivité organisationnelle et compétitivité: l'interchangeabilité des pièces face à la crise de la machine-outil en France autour de 1900", *Entreprises & Histoire*, N° 5, juin, p.53-72.,
- Dalémont J. (1907), *La construction des machines électriques*, Librairie polytechnique, Harvard University,
- Djezzar L. (2003), *Gestion de configuration*, Dunod, Paris,
- Dubar C., Tripier P., (1998), *Sociologie des professions*, A. Colin, Paris,
- Eicher C. et al., (1984), *Mise en oeuvre et réalités de la Gestion de Production Assistée par Ordinateur*, Editions du CESTA,
- Fairburn J., (2008), "Working Towards a Better Quality of Life", Environment Agency, *Environmental Justice in South Yorkshire*, August,
- Fairburn J., (2008), "Inégalités environnementales et risques sanitaires : une perspective du Royaume-Uni". AFSSET, and Sciences PO Paris., 10 April 2008.
- Fixari D., Moisdon J.C., Weil B., (1992) "Rêver l'organisation, vivre l'informatique ? : le cas du Ministère du Travail", *Rapport ENSMP-CGS-CR-93-04*,
- Fodor X., (2008), "Organiser les échanges de données techniques : ARIANESPACE ne travaille pas dans la précipitation", Dossier : Collaboration: Optimisez votre travail, *iTechnologie*, n°2.

Feeney M., 1999, *Digital Culture : Maximising the Nation's Investment : a Synthesis of JISCO/NPO Studies on the Preservation of Electronic Materials*, Londres, National Preservation Office,

Gollac M. et al., (1998), "A quoi sert donc l'informatique ? Revue d'études de cas", *Revue française de gestion*, n° 118,

Ghoul S., (1983), *Base de données et gestion de configurations dans un atelier de génie logiciel*, I.N.P., Grenoble, Thèse de doctorat d'ingénieur,

Giacomoni G., (2002), "Gérer la reproduction d'objets complexes dans un contexte d'innovation permanente : le cas de l'industrie de l'espace", Thèse de Doctorat, ENSMP, Paris,

Grieves M., (2006). *Product Lifecycle Management: Driving the Next Generation of Lean Management.*, New York, NY: McGraw Hill,

Hatchuel A., Sardas J.C., Weil B., (1988), "La mise en œuvre et le pilotage d'une GPAO : à chaque étape ses difficultés", *Revue de l'AFGI*,

Hatchuel A., Sardas J.C., (1992), "Les grandes transitions contemporaines des systèmes de production : une approche typologique", in Dubois M., de Terssac G. (dir.), *Les nouvelles rationalisations de la production*, CEPADUES.

Hatchuel A., Weil B., (1992), *L'expert et le Système*, Economica,

Hatchuel A., Saidi-Kabeche D., Sardas J.C. (1997), "Towards a new planning and scheduling approach for multistage production systems", *International Journal of Production Research*, vol. 35, N°3, pp. 867-886,

Hatchuel A., Weil B., Le Masson P., (2002), "Gestion des connaissances et organisation apprenante", in *Faire de la recherche en systèmes d'information*, Vuibert-FNEGE.

Hatchuel A. et Al., (2004), "La replanification des productions complexes : avancées théoriques et développements en entreprise". *Rapport au Ministère de la Recherche et de l'Espace*, ENSMP.

Hatchuel A., Weil B., (dir.), (2008), *Les nouveaux régimes de la conception, langages, théories, métiers*, Vuibert, Cerisy,

Howse D., (1980), *Greenwich Time and the Discovery of the Longitude*, Oxford Univ. Pr.; 1st Ed,

Hussenot A., (2007), "Dynamiques d'appropriation organisationnelle des solutions TIC : une approche en termes de démarches itératives d'appropriation", *Systèmes d'Information et Management*, Vol. 12, No 1,

Lawrence P., Lorsch J., (1967), *Adapter les structures de l'entreprise - Intégration ou différenciation*, trad. fr., Paris, Editions d'organisation,

Lehmann-Haupt H., (1966), *Gutenberg Master of the Playing Card*, New Haven, Yale University Press,

McMurtie Douglas C., (1942), *The invention of Printing. A Bibliography*, Rochester, N.Y.: Publishing And Printing Dept. Of The Rochester Athenaeum And Mechanics Institute For The Educational Commission Of The International Association Of Printing House Craftsmen,

Marques-Vidal P., Rodondi N., et Al., (2008), "Predictive Accuracy of Original and Recalibrated Framingham Risk Score in the Swiss Population", Centre for Cardiovascular and Metabolic Research, Institute of Social and Preventive Medicine.

Merminod V., Mothe C., Rowe F., (2009), "Effets de Product Lifecycle Management sur la fiabilité et la productivité : une comparaison entre deux contextes de développement produit." *M@n@gement*, 12(4), 294-331.

Merminod V., (2007), "TIC, Partage de connaissances et fiabilité du développement produit distribué : une approche par le "glitch" au sein du Groupe SEB", *Systèmes d'Information et Management*, Vol. 12, No 1,

Mostefai, S., Batouche, M., (2005), "Data integration in Product Lifecycle Management: an ontology-based approach", PLM'05: International conference on product life cycle management, Lyon, France.

Patout Y., (2001), "La réorganisation de la téléphonie par les profils", *Systèmes d'Information et Management*, Vol. 6, No 1,

Perrow C., (1967), "A Framework for the Comparative Analysis of Organizations", in *American Sociological Review*, Vol.32, No.2,

Ramsden J., (1787), *Description d'une machine pour diviser les instruments de mathématiques*, Londres, Bureau des Longitudes, traduite de l'Anglois, Paris,

Rousseau F., (2005), *Conception des systèmes logiciel/matériel : du partitionnement logiciel/matériel au prototypage sur plateformes reconfigurables*, Thèse d'HDR, Université Joseph Fourier – Grenoble I,

Russel B., (1903), *The principles of mathematics*, New York,

Sacquet A., Nowencien R., (1995), "Productivité de la maintenance en Architecture client-serveur", revue *Génie Logiciel* n° 35,

Scholderer V., (1970), *Johannes Gutemberg, The Inventor of Printing*, British Museum; 2nd Ed.,

Simon H., (1976), "From substantive to procedural rationality", in : S. LATSIS, *Method and appraisal in economics*, Cambridge, Cambridge University Press,

Simondon G., (1958), *Du mode d'existence des objets techniques*, Aubier,

Stark, J. (2004). "Product Lifecycle Management - 21st century Paradigm for Product Realization.", *Decision Engineering Series*, Springer Verlag, Berlin,

Updike D.B., (1920), *Printing Types : Their History, Forms and Use*, 2 vol., Harvard and Oxford,

Whitehead A.N., Russel B., (1910), *Principia Mathematica*, Cambridge,

Woodward J., (1965), *Industrial organization. Theory and practice*, Oxford University Press,