



Recommandations pour l'élaboration d'un référentiel d'exigences techniques

Auteurs :

G. FANMUY	(DASSAULT-AVIATION)
G. LEVY	(ALCATEL)
J. FOISSEAU	(ONERA Toulouse)
P. LAMOTHE	(PSA Peugeot Citroën)
B. HERMANS	(GIAT Industries)
P. DE CHAZELLES	(AIRBUS Industrie)
E. CHOVEAU	(EADS Airbus)

Abstract

Ce document présente le concept « d'exigence ». Il liste des bonnes pratiques d'élaboration d'un référentiel d'exigences techniques. Il décrit l'intérêt d'un tel référentiel.

A) Introduction

1 Problématique

L'ingénierie des exigences est la clé du développement de systèmes complexes. Dans les modèles de maturité (Capability Maturity Models), l'ingénierie des exigences est un facteur essentiel de maturité des processus d'ingénierie des systèmes. C'est également une des activités qui influe le plus sur la qualité du système qui en résulte.

La définition de référentiels d'exigences est l'un des facteurs de succès d'un processus répétable.

Par ailleurs, des études ont montré que les erreurs les plus courantes sont celles relatives à la spécification des besoins (ex. études Sheldon sur projets de l'US Air Force, Standish Group...). Ces études illustrent également le fait que les erreurs faites en spécification sont très coûteuses à corriger.

2 Objectif

L'objectif de ce document est d'introduire l'ingénierie des exigences par une liste de pratiques essentielles pour élaborer un référentiel d'exigences à partir d'un besoin.



B) Le concept d'exigence

Notion de besoin exprimé

Le besoin naît de la nécessité, d'une insatisfaction ou du désir d'un utilisateur en relation avec un environnement. L'analyse du besoin consiste alors à révéler et identifier, puis exprimer le besoin (**besoin exprimé**).

Une activité de structuration et de choix permet ensuite de transformer le besoin exprimé en besoin spécifié qui peut être représenté par un ensemble **d'exigences**.

Définition d'une exigence

Une exigence est un énoncé qui traduit (ou exprime) un besoin, des contraintes (techniques, coûts, délais...). Cet énoncé est rédigé dans un langage qui peut prendre la forme d'un langage naturel, d'une expression mathématique – arithmétique – géométrique, informatique ...

Dans le langage naturel, cet énoncé comporte : un sujet, un verbe et un complément.
Exemples :

- 1) *Le groupe de travail Ingénierie des Exigences décrit les concepts relatifs au domaine de la spécification.*
- 2) *Une partie du travail réalisé par le groupe Ingénierie des Exigences est exprimé et formalisé sous la forme d'un ensemble de bonnes pratiques.*

Nota 1 : Une exigence peut être allouée à un composant physique ou logique. Un Composant physique peut désigner le système attendu, un sous-système, un équipement, ... Un composant logique peut désigner une fonction, une sous-fonction, une catégorie d'objets...

Nota 2 : Toute exigence de bas niveau (i.e. exigence élémentaire) doit être allouée à un et un seul composant.

Informations associables à une exigence

Aux exigences d'une spécification est associée une structure de gestion qui comporte des informations associées (liste non exhaustive, liste à ajuster en fonction des projets):

Ces informations peuvent être soit des attributs d'exigences, soit des relations avec des entités associées à l'exigence.

Recommandation : il convient de limiter le nombre d'informations associées aux exigences nécessaires au projet en réfléchissant à l'effort de gestion associé.



Types d'informations associables à une exigence	Signification
Identificateur	Symbole alphanumérique permettant de repérer l'exigence parmi les autres ; l'identificateur est unique, non destructible.
Émetteur	Client, autres parties prenantes : réglementation, normes, concepteur, coopérants, sous-traitants ..., exigence dérivée, ...
Méthode de vérification et validation	Ensemble de tâches et de moyens permettant d'assurer que l'exigence est satisfaite (vérification) et que le système correspond à l'utilisation attendue par le client (validation). Indiquer le type de méthode (inspection, analyse, démonstration, essai ou test), et la référence de la description.
Hypothèses	Conditions sur la validité de l'exigence (phase du cycle de vie produit, condition d'environnement, stratégie d'entreprise ...)
Justification	Éléments permettant de démontrer (ou prouver) le bien fondé ou les raisons du choix de l'exigence.
Relations	Donner les liens avec d'autres exigences ou avec les sources associés.
Catégorie	Exemples de catégories: Fonctionnelle, performance, interface, opérationnelle (disponibilité, maintenabilité, fiabilité, sécurité, vulnérabilité, logistique, environnement, qualité de service...), contrainte, validation.
Criticité	Niveau de criticité vu de l'utilisateur. Permet d'aider à la détermination de l'effort de vérification d'une exigence.
Flexibilité	Capacité de l'exigence à être négociée
Priorité	Niveau d'importance pour la prise en compte de l'exigence par rapport aux autres
Risques	Niveau de risque ou liste des risques engendrés par la prise en compte de l'exigence exprimée tel quel.
État / maturité	État d'avancement de l'exigence (lié au management du projet) : énoncée, officialisée, implémentée, satisfaite
Confidentialité	Niveau de confidentialité de l'exigence
Choix / compromis / décision	Trade Off Analysis (EIA 632)
Historique	Ensemble de repères permettant d'identifier les modifications qu'a subi l'exigence : date, auteur, identification et contenu de la modification, type de modification (ajout, suppression, ...), justification ou raison de la modification.
Commentaires	Remarques pertinentes permettant de comprendre l'origine de l'exigence, les liens avec d'autres éléments ...

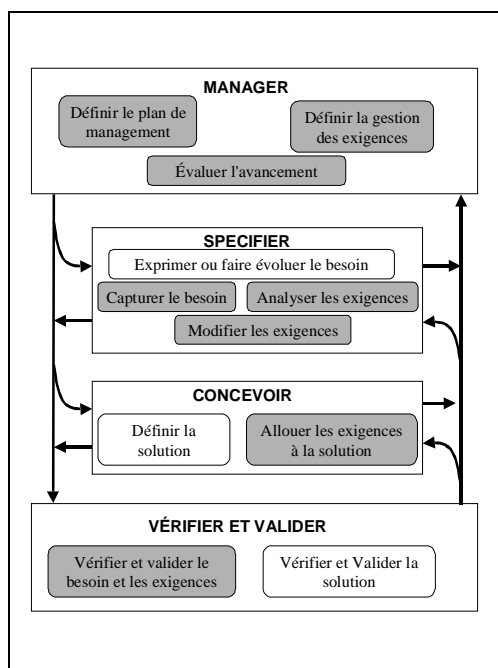
3. Recommandations pour l'élaboration d'un référentiel d'exigences systèmes

Un processus type d'ingénierie des exigences comporte les activités suivantes:

- **Activités de capture du besoin:** découverte / collecte et compréhension / analyse des besoins utilisateurs / parties prenantes, synthèse.
- **Activités d'analyse des exigences :** traduction des besoins en exigences techniques élémentaires, analyse technique des exigences, catégorisation des exigences, synthèse.
- **Activités de vérification et validation des exigences:** analyse individuelle de la qualité des exigences, analyse de cohérence / complétude de l'ensemble des exigences (client, parties prenantes, technique)
- **Activités de modification:** correction / évolution des exigences consécutives aux différentes activités des processus d'ingénierie système.
- **Activités d'allocation:** décomposition et allocation des exigences aux composants du système (en parallèle de la conception du système)
- **Activités de management:** management de projet (préparation, suivi), gestion de la configuration des modifications d'exigences

Nota : L'activité de management n'est pas traitée dans ce document.

Ces activités permettent d'aboutir à un référentiel d'exigences techniques négocié et accepté par les différentes parties prenantes (utilisateurs, client(s), concepteur, ...)



Le schéma présente une organisation type des activités entre - elles, mais ne présuppose pas d'un déroulement temporel

Nota: les activités liées aux productions documentaires ne sont pas décrites. Ce sont des activités en marge de l'ingénierie des exigences et sont volontairement exclues du présent document. Il est considéré que si nécessaire, des documents d'exigences peuvent être élaborés à partir du référentiel d'exigences.



3.1. Bonnes Pratiques de Capture du Besoin

BP1.1. Identifiez et consultez toutes les parties prenantes du système à concevoir (acteurs, entités ou organisations pouvant générer des exigences).

Cette consultation doit permettre de capturer l'ensemble des besoins des parties prenantes : recherche du besoin réel utilisateur, client ou autres parties prenantes (maintenance, formation, environnement...) - Cf. exemples A.1 et A.2 en annexe.

BP1.2. Formalisez les besoins sous forme d'exigences

A ce niveau les exigences peuvent être incomplètes et ne pas présenter les facteurs qualité attendus. Si les exigences sont volumineuses, il est recommandé de repérer dans le texte les exigences élémentaires possibles.

BP1.3. Établissez la traçabilité descendante et remontante de chaque exigence

L'enregistrement de l'origine (client, utilisateur, concepteur ...) permet de garder la trace qui a demandé l'exigence et dans quel contexte (traçabilité remontante). Les liens avec les exigences aval permettent de s'assurer que ce qui est spécifié est correctement implémenté (traçabilité descendante). Cette traçabilité dans les deux sens permet d'effectuer des analyses d'impact en cas de modifications. Permet également d'analyser les exigences en fonction du porteur de l'exigence (ex. un seul système réalisé pour plusieurs clients avec des besoins différents). – Cf. exemples A.3.1 et A.3.2 en annexe

BP1.4. Utilisez un langage simple et concis pour formuler une exigence.

La formulation d'une exigence doit être claire et sans ambiguïtés afin d'être comprise. Typiquement une exigence est bâtie sur une structure « sujet, verbe, complément » et se limiter à quelques lignes.

BP1.5. Justifiez l'exigence.

La justification de l'exigence permet de comprendre l'enjeu et la priorité de celle-ci. La justification peut se limiter dans certains cas à la demande client. La justification permet d'éviter les cas de sur-spécification. Elle permet également de comprendre pourquoi l'exigence a été demandée.

BP1.6. Définissez une structure standard de document pour le recueil des exigences (plan type).

L'utilisation d'une structure standard permet d'assurer une meilleure communication des exigences entre les acteurs du projet et permet de construire un référentiel d'exigences.

BP1.7. Utilisez des scénarios opérationnels afin de comprendre le besoin réel.

Nota : A ce stade des exigences nouvelles peuvent émerger – Cf. exemple A.4 en annexe

BP1.8. Vérifiez au moins l'adéquation des exigences réutilisées au nouveau contexte.

La réutilisation d'une exigence ou d'un ensemble d'exigences permet de gagner du temps dans la phase d'analyse et peut être dans la phase de conception du produit (pré-requis : existence d'un organe répondant strictement à l'exigence ou à l'ensemble d'exigences). Il est nécessaire avant de réutiliser de vérifier si le contexte a changé ou non. – Cf. exemple A.5 en annexe

Plus généralement, avant de réutiliser, il convient de se poser un certain nombre de questions: vérifier si le contexte a changé, vérifier si l'exigence est justifiée ...



3.2. Bonnes Pratiques d'Analyse des exigences

BP2.1. Formalisez les exigences de besoin en exigences techniques

Une exigence doit faire quelques lignes. Attention, trop découper une exigence risque de faire perdre son contexte une fois prise isolément. Lorsque l'on a un nombre important d'exigences (> quelques centaines) il faut privilégier la compréhensibilité. Il est parfois préférable qu'une exigence soit associée à son contexte, mais que le libellé même de l'exigence soit repéré dans le texte.

Utilisez des règles d'écriture pour homogénéiser les formulations et éviter des ambiguïtés.

BP2.2. Regroupez les exigences techniques en catégories

L'affectation de catégories aux exigences facilite les activités d'analyse technique et de validation par les parties prenantes : complétude des exigences, cohérence des performances... Elle permet de s'assurer de l'implication de l'ensemble des parties prenantes (pas d'oublis). Il est recommandé d'utiliser des catégories standard pour une meilleure efficacité. – Cf. exemple A.6 en annexe.

BP2.3. Etablissez la traçabilité descendante et remontante de chaque exigence.

Cf. paragraphe 3.1 n°3

BP2.4. Justifiez les exigences techniques dérivées (terminologie EIA632 "derived requirement").

Des exigences techniques peuvent être révélées au cours du développement (ex. exigences de conception, exigences normatives...). Tout comme les exigences de besoin, leur justification permet de comprendre l'enjeu et leur priorité.

BP2.5. Prévoyez la méthode de vérification et de validation du produit associée à chaque exigence (théorique, expérimentale, examen visuel, simulation, essai ...).

Permet de se poser la question : le produit est-il testable (comment et par quels moyens) ? Saura-t-on assurer la conformité du produit aux exigences (vérification) ; saura-t-on satisfaire les besoins utilisateurs (validation) ? Si la testabilité du produit n'est pas acquise, les exigences concernées sont-elles réalistes ? – Cf. exemples A.7.1 et A.7.2 en annexe

Une exigence non testable sur le produit n'est pas toujours à rejeter.

Une méthode de vérification/validation du produit peut couvrir plusieurs exigences.

Une exigence est en général couverte par plusieurs essais.

Assurez la traçabilité des méthodes de vérification/validation avec les exigences associées.

BP2.6. Modélisez, simulez pour lever les ambiguïtés

La modélisation / simulation permet de lever les ambiguïtés, de préciser/compléter des exigences. Elle permet de se poser les questions sur le besoin réel et de valider le besoin.

BP2.7. Vérifiez au moins l'adéquation des exigences réutilisées au nouveau contexte.

Cf. paragraphe 3.1 n°9



3.3. Bonnes Pratiques de Vérification et de Validation des besoins et des exigences

BP3.1. Définissez les facteurs de qualité attendus d'une exigence/d'un référentiel d'exigence et élaborer une liste de vérification.

Checklist : propriétés d'une exigence

- Concise : pas de hors sujet
- Non ambiguë : une seule interprétation possible (aspects syntaxique et sémantique)
- Nécessaire : à quel besoin répond-elle?
- Exacte : vis à vis de l'expression initiale du besoin
- Atteignable : réalisable, faisable
- Vérifiable
- Traçable

Checklist : propriétés d'un référentiel d'exigences

- Cohérent : pas de contradictions entre exigences ou avec les besoins opérationnels
- Complet : pas d'omissions ni de références inexistantes

Nota : à un stade initial du processus (élaboration d'un premier référentiel d'exigences système), il n'est pas garanti que les exigences soient toutes faisables et vérifiables. Dans certains cas cette garantie ne pourra être assurée qu'au cours des activités d'allocation/conception. Par contre ce premier référentiel d'exigences obtenu doit être cohérent. La complétude à 100% du référentiel d'exigences n'est également pas assurée à ce stade car des exigences issues de la décomposition des exigences (allocation) ou induites par la conception peuvent être manquantes.

BP3.2. Relisez l'ensemble des exigences et vérifiez leur compréhension.

De cette première relecture le lecteur doit comprendre dans les grandes lignes ce que l'on attend du système dans son environnement opérationnel. En particulier, on doit être capable d'identifier l'ensemble des acteurs externes au système, leurs interactions et interfaces (à haut niveau tout au moins). Cette analyse permet d'aider à détecter des exigences manquantes ou incomplètes.

L'énoncé d'une exigence doit être court (quelques lignes) et concis ("pas de littérature").

Les exigences qui contiennent des mots imprécis sont à retravailler (ex. adverbes: peu, assez, souvent, rapidement, aussitôt; adjectifs: divers, plusieurs, rapide, quelques...)

Les exigences « suspectes » (significations obscures/à clarifier, significations multiples, énoncés longs ou complexes, exigences incorrectes, exigences dont l'origine est à clarifier...) doivent être repérées.

BP3.3. Vérifiez la nécessité des exigences

Une exigence n'a de sens que si elle répond à un besoin (explicite ou implicite). Une exigence non justifiée est une exigence « suspecte » à repérer. On doit pouvoir répondre à la question suivante : « pourquoi cette exigence est-elle nécessaire ? » (cf. traçabilité).



BP3.4. Assurez-vous que les exigences sont vérifiables

Une exigence doit être vérifiable et validable (par des moyens théoriques, des essais...), c'est à dire il est prévu une méthode de vérification / validation (ex. méthode de tests,...). Toute exigence non tracée vers une méthode de vérification est à considérer comme « suspecte » (cf. traçabilité).

*Nota: il se peut qu'une exigence ne soit pas testable (ex. technologie de tests non disponible, infinité de scénarios de tests...). C'est alors une exigence **à risque**.*

BP3.5. Contrôlez la traçabilité des exigences

Une exigence dont l'origine n'est pas connue est une exigence « suspecte » à repérer. Elle est d'autant plus suspecte quelle n'est pas justifiée et on peut alors s'interroger sur son intérêt.

Une exigence a d'autant plus de chances d'être juste que son origine est tracée.

Plus généralement, toute exigence doit être tracée. A ce stade les questions à se poser sont : « comment est-on arrivé à cette exigence ? », « Cette exigence est-elle nécessaire ? »

BP3.6. Contrôlez l'absence de conflits , d'incohérences, dans le référentiel d'exigences

Un nouveau parcours du référentiel d'exigences doit permettre de s'assurer de la cohérence de l'ensemble des exigences. Il s'agit de vérifier la cohérence interne et externe. Cohérence interne: aucune exigence ne contredit une autre exigence et aucune exigence n'est redondante avec une autre exigence.

Cohérence externe: aucune exigence ne contredit les besoins opérationnels du système (ou besoins initiaux).

Ce parcours est d'autant plus difficile que le nombre d'exigences est important (il est difficile de se rappeler de l'exigence n°1 à l'exigence n°300). Néanmoins cette vérification peut être effectuée en s'aidant de catégories d'exigences (analyse par point de vue). Elle peut également être facilitée par la hiérarchisation en sous-systèmes.

BP3.7. Contrôlez la complétude du référentiel d'exigences

Un premier niveau de complétude doit être atteint pour le référentiel d'exigences. Il convient de s'assurer que l'on a couvert l'ensemble des besoins. De même que pour la cohérence, cette vérification peut être assurée en s'aidant des catégories d'exigences (analyse par point de vue).

Cette première vérification sera à compléter dans les phases suivantes du processus par la complétude de l'ensemble des exigences (système + allouées).

BP3.8. Reprenez l'ensemble des exigences « suspectes », repérées. Réitérez l'ensemble du processus.

Réitérer jusqu'à élimination des exigences « suspectes » (i.e. « à risque »).

BP3.9. Organisez des revues formelles d'exigences

Organisez des revues formelles d'exigences avec l'ensemble des parties prenantes. Pour chaque intervenant, définissez des rôles de vérification clairement définis. Définissez des critères d'acceptation d'exigences.

BP3.10. Obtenir l'accord du client sur les exigences qui sont de sa responsabilité



3.4. Bonnes Pratiques d'Allocation des exigences à la solution

BP4.1. Décomposez les exigences en exigences élémentaires

Une exigence de niveau système est à décomposer en exigences élémentaires applicables aux différents composants du système (composants logiques ou physiques) : cf. bonnes pratiques d'élaboration des exigences techniques. Lorsque l'on décompose une exigence, il convient de trouver le niveau de décomposition adapté à la compréhensibilité des exigences élémentaires. L'objectif est d'identifier les services attendus des composants du système (avec leur contexte). Il ne faut décomposer une exigence que si cette décomposition précise la définition de l'exigence (ajout d'information). Les exigences candidates à la décomposition sont principalement celles qui sont affectées à plusieurs catégories, celles qui ne sont affectées à aucunes catégories, celles qui ne sont pas allouées aux composants du système, celles dont l'énoncé est volumineux ...

BP4.2. Identifiez les exigences issues de la conception

Des exigences peuvent être induites par les activités de conception du système (exemples : exigences de réutilisation, exigences d'architecture logique, exigences d'interfaces...). Il convient d'intégrer ces exigences avec leur historique dans le référentiel (cf. paragraphe 3.5). Il est préférable de les distinguer des autres exigences.

BP4.3. Allouez les exigences élémentaires aux constituants du système

On doit s'efforcer à ce que chaque exigence élémentaire issue d'une décomposition soit allouée à un composant du système. Une exigence qui est allouée à plusieurs composants n'est pas à considérer comme élémentaire : c'est une exigence à risque.

BP4.4. Etablissez la traçabilité descendante et remontante de chaque exigence (traçabilité).

Permet de s'assurer que les exigences élémentaires sont nécessaires et suffisantes pour satisfaire les objectifs des exigences des niveaux supérieurs. Permet de s'assurer que chaque exigence élémentaire est allouée à un composant du système / chaque composant du système est spécifié par au moins une exigence. Permet d'effectuer des analyses d'impact en cas de modifications.

3.5. Bonnes Pratiques de Modification des exigences

Une modification d'exigence peut avoir deux origines :

- Evolution du besoin
- Modification de la solution en cours de développement / réalisée

BP5.1. Analysez l'impact des modifications d'exigences

Lorsqu'une exigence est modifiée, contrôlez la cohérence interne et externe en s'aidant des liens de traçabilité. Cette cohérence peut être vérifiée en s'aidant des catégories d'exigences (analyse par point de vue).

Identifiez et mettez à jour les autres exigences impactées par la modification.



BP5.2. Maintenez l'historique des modifications apportées aux exigences

Permet de connaître qui, quand et pourquoi une exigence a été modifiée : point fondamental pour des systèmes à longs cycles de développement, des systèmes destinés à plusieurs clients avec des fonctions assurées différentes. Dans un souci d'efficacité (lourdeur de formalisation), il n'est pas toujours nécessaire d'élaborer un historique. C'est le cas par exemple des modifications touchant la forme et non le fond tels que des reformulations, des découpages d'exigences... Seules les décisions qui ont un effet significatif sur le coût, la technique, la logique de développement... sont à maintenir.

4. Intérêts d'un Référentiel d'exigences techniques

Nous avons détaillé dans le paragraphe précédent un ensemble d'activités du processus d'ingénierie des exigences; le résultat de ces activités se concrétisent par une base d'informations, le référentiel d'exigences.

Le référentiel est un instrument de communication entre les différents intervenants dans la définition d'un système.

C'est le support de la collecte des exigences, de leurs analyses et de leur validation par les différentes parties prenantes.

C'est aussi le support pour la production de documents du style spécification des besoins, cahiers des charges, exigences utilisateur, etc. Le standard retenu peut imposer une mise en forme, une présentation type de tels documents.

Le référentiel d'exigences est une base d'informations vivante.

Plusieurs raisons:

- Il est illusoire de croire qu'on pourra disposer de toutes les exigences avant que ne commencent les étapes de conception et réalisation. Il faut donc pouvoir faire évoluer un tel référentiel d'exigences en contrôlant la cohérence de ces évolutions.
- De nouvelles exigences vont surgir pendant les activités de développement de la solution en réponse au système désiré. Ces exigences, appelées exigences dérivées dans l'EIA 632, découlent des activités d'ingénierie, des savoir-faire métier, des techniques envisagées, etc. Ces exigences dérivées doivent faire partie du référentiel d'exigences; exigences initiales et exigences dérivées doivent bien sûr constituer un ensemble organisé, structuré et cohérent
- Un système évolue au fil de sa vie : ajout de nouvelles fonctionnalités, remplacement de composants ou de sous ensembles pour cause d'obsolescence techniques ou de performances insuffisantes, etc. Maîtriser les exigences du système implique de gérer ces évolutions dans le référentiel d'exigences pour aider à mesurer les impacts des modifications, et aussi pour disposer à tout instant de la vie du système les exigences qu'il remplit.

Les activités de conception et de réalisation de la solution système interagissent avec le référentiel d'exigences

La nécessité, le rôle, et la définition des fonctions, sous fonctions, ainsi que les composants physiques identifiés tout au long de ces activités découlent du référentiel d'exigences courant. Le référentiel d'exigences est alors utilisable pour montrer

- la couverture des exigences, et



- la satisfaction des exigences
par la solution développée (d'où la nécessité de relier ces exigences aux éléments de conception par des relations d'allocation par exemple)

La satisfaction du besoin est établi à l'aide du référentiel d'exigences

Quelques soient les tests réalisés sur la solution développée (tests unitaires, tests d'intégration), il faut aborder la validation par les utilisateurs et les parties prenantes du système réalisé. Le référentiel d'exigences est la traduction des besoins. Les informations sur la vérification des exigences qu'il contient sont alors exploitées pour argumenter que la solution fournie satisfait bien les besoins.

Véritable carte d'identité du système (futur ou existant), le référentiel d'exigences est la structure d'informations pivot de l'ingénierie des systèmes. C'est la référence, (qui peut évoluer dans le temps) des activités de conception, vérification, validation et soutien. Il doit cependant être accompagné d'une structure de traçabilité pour permettre de relier les exigences aux éléments de conception, les exigences entre elles et les exigences avec leur origine.

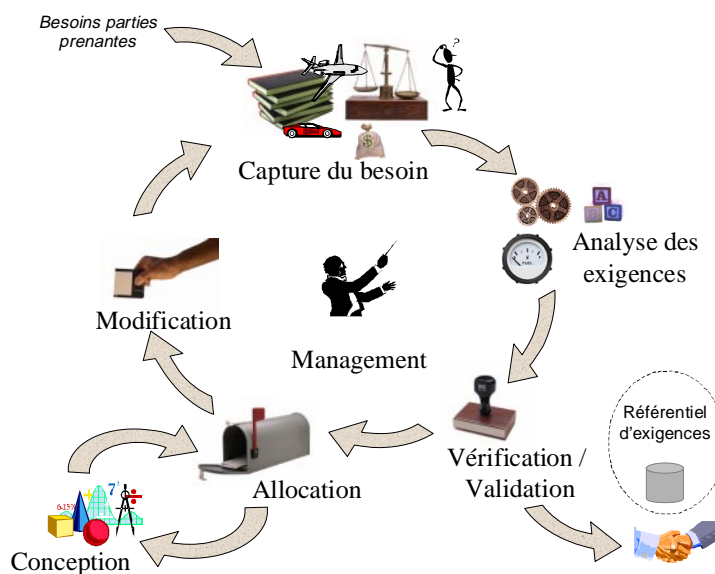


5. Conclusion

Un référentiel d'exigences est un outil puissant d'aide à la maîtrise du développement d'un système et aussi à la maîtrise de son évolution tout au long de sa vie. Il permet de répondre à des questions importantes telles que :

- A quel client est destiné quelle fonctionnalité du système ?
- Combien d'exigences sont identifiées sur ce projet ? Combien parmi elles ont-elles une priorité élevée ?
- Quand seront implémentés les exigences dans le produit ?
- Quelles exigences ont été modifiées depuis la dernière revue client ? Qui est responsable des modifications ?
- Quel est l'impact du coût estimé des modifications proposées ?
- ...

L'élaboration d'un référentiel d'exigences est complexe mais nécessaire pour l'obtention d'un système de qualité (technique, coûts, délais). Il nécessite l'implication des différentes parties prenantes externes (utilisateurs, client(s)...) et internes (direction, chefs de projets, métiers ..., partenaires, sous-traitants...). Il met en œuvre un ensemble d'activités nécessitant une gestion rigoureuse.



Les bonnes pratiques listées dans ce document sont des pistes pour élaborer un référentiel de qualité. Ces pratiques sont issues d'expériences industrielles réelles. Elles sont à ajuster par chacun à ses propres processus.

Annexe A: Exemples

A.1. Exemples de parties prenantes

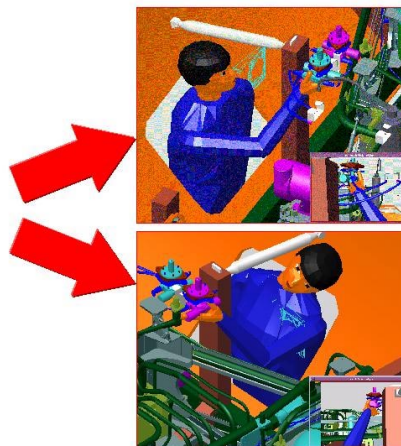
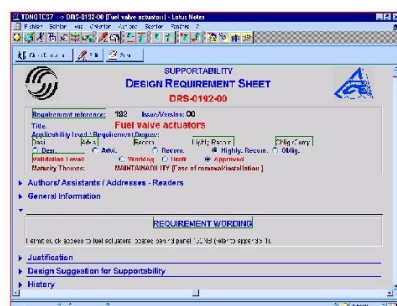
(source AFIS)

- Client(s)
- Utilisateurs
- Direction de l'entreprise
- Organismes normatifs
- Gouvernement
- Marketing
- Fournisseurs
- Public
- Concepteur
- Après-vente, maintenance
- Testeurs
- Qualité
- Soutien
- Formateurs
- Systèmes connexes (production, vente, transport ...)
- ...

A.2. Exemple sur l'intérêt de consulter toutes les parties prenantes

(source Aérospatiale Matra Airbus)

Accessibilité actionneurs carburant sur Airbus A340 500-600



La capture d'une exigence très tôt dans le cycle permet de prendre en compte l'ensemble des contraintes et de faire les compromis nécessaire.

Dans l'exemple, la prise en compte des contraintes de soutien en conception permet de se préoccuper des problèmes d'accessibilité pour la maintenance.

Une simulation permet de valider l'exigence.



A.3. Exemple de transformation d'une exigence par niveaux / intérêt de la traçabilité

A.3.1 Critères de chocs automobile EURONCAP

(source PSA)

Cet exemple permet de visualiser la transformation d'une exigence par niveau de décomposition d'un système véhicule et d'illustrer la notion de traçabilité entre exigences.

L'exigence d'origine correspond à la protection des passagers vis-à-vis des chocs latéraux ; il s'agit à ce niveau d'un besoin client.

Cette exigence se transforme en exigence technique système à l'aide de critères issus de normes sur le crash véhicule ; ce sont les critères EURONCAP, ils sont souvent cités dans la presse automobile.

On peut représenter les différentes étapes de cette transformation d'exigence sur le tableau ci-dessous. Les paramètres numériques associés à chaque niveau de transformation sont obtenus à l'aide du calcul crash véhicule.

Niveaux de décomposition	Enoncé de l'exigence
Client	Protéger les passagers des chocs latéraux.
Véhicule	Le véhicule tient les critères EURONCAP 4* en choc latéral.
Sous-système véhicule	La décélération du sous-système structure est limitée à $x \text{ m/s}^2$.
Organes	La vitesse de déformation de la structure est limitée à $x \text{ m/s}$.
Sous-organes	La déformation maximale du renfort de porte est de $x \text{ m}$.
Composants	La géométrie à réaliser est : (ensemble de coordonnées...). L'épaisseur et la nuance des matériaux.
Sous-composants	Le plan de fabrication est : ...

Cet exemple illustre également les points fondamentaux suivants:

- Intérêt de la traçabilité:
 - En cas de modifications de la norme, de l'exigence mère, des contraintes de style, des contraintes de poids...
 - Vérifier la prise en compte de l'exigence du client à tous les niveaux
- Niveau de décomposition: risque de trop décomposer les exigences (lourdeur, gestion difficile, perte de compréhensibilité...)

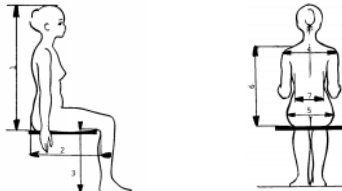
A.3.2. Siège Avant d'un véhicule automobile

(source AFNOR/AFAV ouvrage « Exprimer le besoin »)

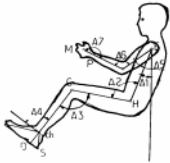
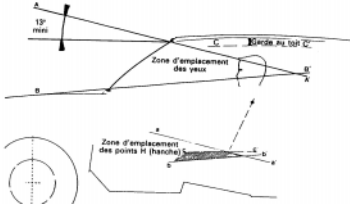
Cet exemple permet d'illustrer la différence entre un besoin et une exigence technique.

L'exigence d'origine est de réaliser un siège avant pour permettre au conducteur de se positionner dans le poste de conduite .

Cette exigence d'origine se décline en exigences techniques

Niveaux de décomposition	Enoncé de l'exigence
Exigence d'origine	Permettre au conducteur de se positionner dans le poste de conduite
Exigences techniques	Dimensions principales d'un siège selon une population hommes/femmes <ul style="list-style-type: none"> • hauteur buste • largeur aux épaules • largeur bassin • largeur hanches • largeur du torse • ... 



	<p>Angles de confort à assurer</p> <ul style="list-style-type: none"> • $20^\circ < A1 < 30^\circ$ • $95^\circ < A2 < 120^\circ$ • $95^\circ < A3 < 135^\circ$ • $86^\circ < A4 < 105^\circ$ • $0^\circ < A5 < 45^\circ$ • ... 
	<p>Angles de vision à préserver</p> 
	<p>Confort de membres inférieurs : choix d'un Hx (hauteur d'assise en fonction des points d'accélération)</p>

A.4. Exemple sur l'intérêt des scénarios d'utilisation

A.4.1 Exemple manœuvre parking : rayon de braquage

Cet exemple décrit un scénario d'utilisation du véhicule. Le but est spécifier des hypothèses de géométrie (formes) et de direction du véhicule pour avoir des degrés de flexibilité et pouvoir spécifier des grandeurs en fonction des différentes contraintes de style, technique...

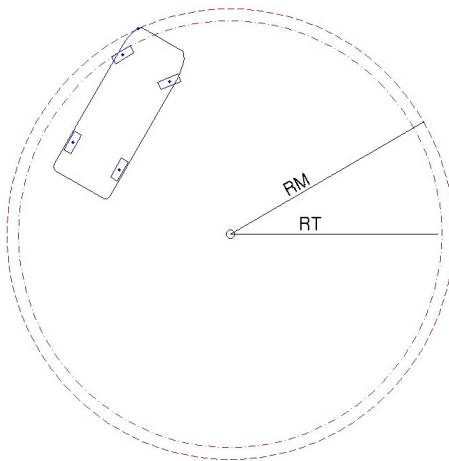
L'étude du scénario permet :

- de prendre conscience d'éventuelles nouvelles exigences pour le système ;
- d'affiner la définition des fonctions réellement attendues ;
- de préciser le contexte d'utilisation et donc les parties concernées par la satisfaction de la fonction.

Description du scénario dans ce cas précis :

Le véhicule roule à basse vitesse, volant braqué à fond à droite (idem à gauche). On s'intéresse principalement aux rayons de braquage entre murs et entre trottoirs, qui correspondent respectivement aux maximum des rayons des trajectoires des points de la caisse d'une part et des roues d'autre part.

La finalité de cette utilisation est de déplacer le véhicule dans un endroit exigu. On constate alors que parcourir la trajectoire décrite implique un changement de position et d'orientation. La recherche de compromis entre des deux valeurs permet d'aboutir à de nouvelles exigences comme par exemple : contrôle en translation du véhicule et contrôle en rotation du véhicule.



Trajectoire du véhicule lors de la manipulation *rayon de braquage*.



A.5. Exemple sur l'intérêt de vérifier l'adéquation au contexte avant de réutiliser

(source communiqué de presse ESA-CNES du 23/07/99)

Le vol inaugural d'Ariane 5 qui a eu lieu le 4 juin 1996 s'est soldé par un échec : environ 40s après le démarrage de la séquence de vol, le lanceur a dévié de sa trajectoire, s'est brisé et a explosé.

Les causes de cet échec ont été attribuées au Système de Référence Inertiel (SRI) dont la conception logicielle est pratiquement la même que celle d'un SRI Ariane 4 : une exception logicielle a provoqué l'envoi de données d'attitudes erronées (azimut, assiette, gîte).

Cette exception logicielle s'est produite pendant une conversion de Biais Horizontal (BH) de représentation flottante à 64 bits en valeurs entières à 16 bits. Or Ariane 5 a des valeurs de vitesse horizontales considérablement supérieures à Ariane 4, ce qui se traduit pour la 1^{ère} partie de la trajectoire par une valeur de BH plus élevée que la valeur escompté.

Les données transmises par le SRI au calculateur de bord (OBC), qui correspondaient à un profil de bit spécifique de la panne, ont été interprétées comme étant des données de vol. L'OBC a commandé le braquage des tuyères sur la base de ces informations. L'angle d'attaque résultant a conduit, sous l'effet des charges aérodynamiques à la désintégration du lanceur.

Dans cet exemple, c'est une exigence imposée il y a plus de 10 ans sur les premiers modèles de lanceurs Ariane qui est à l'origine de cet échec. L'exigence réutilisée spécifiait un maintien de la fonction alignement pendant 50s après le passage en mode vol. Sur Ariane 4, cette fonction particulière devait permettre la possibilité de conserver une fenêtre de lancement étroite face à l'éventualité peu probable d'un arrêt de chronologie entre H0-9s et H0-5s, en évitant un lancement de la procédure normale d'alignement de 45 minutes.

Or cette exigence n'avait pas lieu d'être sur Ariane 5 dont la procédure d'alignement est différente. Elle a été conservée pour des raisons de communalité, qui semblent reposer sur le principe selon lequel il n'est pas opportun, sauf preuve du contraire, de procéder à des modifications sur des logiciels qui ont bien fonctionné.

A.6. Exemples de catégories

(source AFIS)

- Fonctionnelle
- Performance
- Interface
- Opérationnelle (disponibilité, maintenabilité, fiabilité, sécurité, vulnérabilité, logistique, environnement, qualité de service...)
- Contrainte
- Validation
- ...

A.7. Exemples sur l'intérêt de définir des méthodes de vérification/validation

A.7.1. Validation d'exigence technique d'un système de Chaîne de Traction automobile (partie commande d'embrayage)

(source PSA)

Un profil effort / course pédale d'embrayage est élaboré suite à des calculs et un retour d'expérience.

Il résulte:

- d'une somme d'exigences techniques (dont passage $C=C_{\text{moteur}}$ à $C=0$)
- exigence de confort : agrément de conduite au passage de vitesse

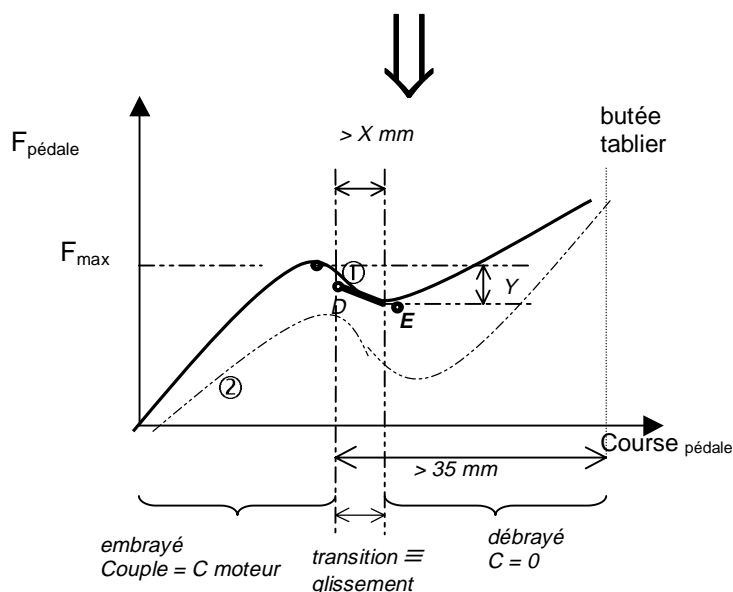
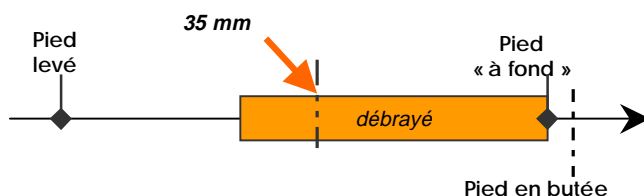


- exigence de sécurité : éviter les à-coups au passage de vitesse (éviter que l'effort chute brusquement avant de débrayer)

Le système, une fois conçu, doit vérifier ce profil.

ST Chaîne de Traction (CdT)

- ① Obtenir une loi **course / effort de la pédale d'embrayage**
 - grandeurs physiques propres aux métiers CdT à spécifier :
 - Débrayer X mm avant le **point d'ensellement E** (point de libération du disque d'embrayage induisant un relâchement de l'effort sur la pédale);
 - Obtenir un écart d'effort Y entre les points F_{max} et E ;
- ② Obtenir un **retour d'information de la position de la pédale** au moment du débrayage et un avalement nécessaires pour l'aide au débrayage
 - Respecter une pente mini au **point D** et ensellement Y mini ;
⇒ encadrement de l'ensellement E ;
- ③ Respecter la **contrainte de débrayer** à partir de 35 mm avant la position « pédale en fin de course » (contrainte normative) permettant d'assurer que $C=0$ lorsque le pied est « à fond »





Exemples de validation **sur banc d'essai** :

① **Loi position / effort pédale d'embrayage** :

- Validation de la pente d'ensellement autour du point d'embrayage D
- Validation du débrayage X mm minimum avant le point d'ensellement
- ...

⇒ par ce biais est validé la contrainte de débrayer 35 mm au plus tard avant la position « pied à fond »

② **Flexibilité du système de commande intégré** : mesurer l'effort pédale Y / effort fourchette en fonction de la course pédale

③ **Couple transmis par l'embrayage** :

- mesure couple transmis en fonction de la position fourchette pour s'assurer que $C=0$ à partir du point E

A.7.2. Validation d'exigence d'utilisation opérationnelle d'un avion d'armes

(source Dassault Aviation)

L'exigence est « Le système d'armes de l'avion sera défini pour une utilisation dans un environnement électromagnétique particulièrement dense, comprenant des systèmes amis et ennemis »

Commentaires :

- Les conditions de vérification / validation sont imprécises : pas de précisions sur les niveaux électromagnétiques à respecter
- Plusieurs moyens / scénarios de vérification car plusieurs systèmes amis/ennemis : AWACS, radars sol, radars aéroportés, porte-avions, systèmes de défense aérienne...

Risques :

- Impact coûts, délais
- Insatisfaction client : démonstration de satisfaction de l'exigence non faisable

Bénéfices :

Dans cet exemple, définir les méthodes de vérification / validation de l'exigence permet de se mettre d'accord sur les Conditions d'Acceptation et d'éviter tout conflit potentiel ultérieur.



Annexe B: Correspondance avec les pratiques CMMi

Activités d'Ingénierie des Exigences	CMMi continuous representation (V0.2)
	<i>Requirement Management</i>
Analyse	Goal 1 - SP1 "Obtain Requirements"
Modifications	Goal 1 - SP2 "Manage Requirements Changes (Level 2)"
Capture / Modifications	Goal 1 - SP3 "Manage Requirements Traceability (Level 2)"
Management	Goal 1 - SP4 "Track Work Effort Against Requirements"
Management	Generic Practices <ul style="list-style-type: none"> • Establish an Organizational Policy • Plan the Process • Train People • Manage Configurations • Monitor and Control the Process • Objectively Verify Adherence • Provide Resources
	<i>Customer and Product Requirements</i>
Capture	Goal 1 – SP1 "Collect Stakeholder needs"
Capture	Goal 1 – SP2 "Elicit needs (Level 2)"
Capture	Goal 1 – SP3 "Transform Stakeholder needs, Expectations, and Constraints into Customer Requirements "
Capture	Goal 1 – SP4 "Obtain Agreement"
Capture	Goal 1 – SP5 "Develop Operational Concepts and Scenarios"
Validation	Goal 1 – SP6 "Validate Customer Requirements (Level 3)"
Validation	Goal 1 – SP7 "Perform Quantitative Validation of Customer Requirements (Level 4)"
Allocation	Goal 2 – SP1 "Derive Product Requirements"
Allocation	Goal 2 – SP2 "Establish a Functional Architecture"
Allocation	Goal 2 – SP3 "Reduce Product Cost and Risk (Level 3)"
Allocation	Goal 2 – SP4 "Identify Internal Interface Requirements"
Analyse	Goal 2 – SP5 "Analyze the Adequacy of Requirements (Level 2)"
Management	Generic Practices <ul style="list-style-type: none"> • Establish an Organizational Policy • Plan the Process • Assign Responsibility • Train People • Manage Configurations • Monitor and Control the Process • Objectively Verify Adherence • Provide Resources

Activités d'Ingénierie des Exigences	CMMi staged representation (V0.2)
	<i>Requirement Management (Level 2)</i>
Management	CO1 "Establish an Organizational Policy"
Management	AB1 "Plan the Process"
Management	AB2 "Provide Resources"
Management	AB3 "Assign Responsibility"
Management	AB4 "Train People"
Analyse	AC1 "Obtain Requirements"
Modifications	AC2 "Manage Requirements Changes (Level 2)"
Capture / Modifications	AC3 "Manage Requirements Traceability (Level 2)"
Management	AC4 "Track Work Effort Against Requirements"
Management	DI1 "Perform Managed Process"
Management	DI2 "Manage Configurations"
Management	DI3 "Monitor and Control the Process"
Management	VE1 "Review Activities and Results with Management"
Management	VE2 "Objectively Verify Evidence"
	<i>Customer and Product Requirements (Level 3)</i>
Management	CO1 "Establish an Organizational Policy"
Management	AB1 "Plan the Process"
Management	AB2 "Provide Resources"
Management	AB3 "Assign Responsibility"
Management	AB4 "Train People"
Capture	AC1 "Elicit Needs"
Capture	AC2 "Transform Stakeholder needs, Expectations, and Constraints into Customer Requirements "
Analyse / Validation	AC3 "Obtain Agreement"
Capture	AC4 "Develop Operational Concepts and Scenarios"
Analyse	AC6 "Validate Customer Requirements"
Capture	AC7 "Derive Product Requirements"
Management	AC8 "Reduce Product Cost and Risk"
Allocation	AC9 "Identify Internal Interface Requirements"
Analyse / Allocation	AC10 "Analyze the Adequacy of Requirements"
Management	DI1 "Perform Defined Process"
Management	DI2 "Manage Configurations"
Management	DI3 "Monitor and Control the Process"
Management	VE1 "Review Activities and Results with Management"
Management	VE2 "Objectively Verify Evidence"