Conception et programmation orientées objet

Bertrand Meyer

Traduit de l'anglais par Pierre Jouvelot

 ISBN : 978-2-212-12270-1

EYROLLES

1

La qualité du logiciel

L'ingénierie traque la qualité ; le génie logiciel vise la production de logiciels de qualité. Ce livre présente un ensemble de techniques qui promettent d'améliorer sensiblement la qualité des produits logiciels.

Avant d'étudier ces techniques, nous devons clarifier leurs raisons d'être. La qualité du logiciel résulte de la combinaison de plusieurs facteurs. Ce chapitre analyse certains d'entre eux, dégage les points qui méritent d'être améliorés et esquisse les grands axes possibles de solutions que nous explorerons lors de notre parcours.

1.1 FACTEURS EXTERNES ET INTERNES

Nous souhaitons tous que nos systèmes logiciels soient rapides, fiables, faciles à utiliser, simples à lire, modulaires, structurés et ainsi de suite. Mais ces adjectifs recouvrent deux classes de qualités bien différentes.

D'un côté, nous envisageons des qualités comme la vitesse ou la facilité d'utilisation, dont la présence, ou non, dans un produit logiciel peut être détectée par ses utilisateurs. Ces propriétés peuvent être appelées des facteurs **externes** de qualité.

> Derrière le mot "utilisateur", nous devrions envisager non seulement les personnes qui interagissent effectivement avec les produits finaux, comme l'agent d'une compagnie aérienne utilisant un système de réservation des vols, mais aussi celles qui achètent le logiciel ou en commandent la réalisation à l'extérieur, comme le décideur d'une compagnie aérienne chargé d'acquérir ou de passer commande de systèmes de réservation des vols. Ainsi, une propriété comme la facilité avec laquelle le logiciel peut être adapté aux changements de spécifications — appelée *extensibilité* ci-après — tombe dans la catégorie des facteurs externes, bien qu'elle puisse ne pas être d'un intérêt immédiat pour les "utilisateurs finaux" que sont, par exemple, les agents de réservation.

Les autres qualités d'un produit logiciel, comme celles d'être modulaire ou facile à lire, sont des facteurs **internes**, seulement perceptibles aux informaticiens professionnels qui ont accès au texte source du logiciel.

En fin de compte, seuls les facteurs externes ont de l'importance. Si j'utilise un navigateur Web ou si j'habite près d'une centrale nucléaire gérée par ordinateur, je me soucie peu de savoir si le programme source est lisible ou modulaire quand le chargement des images prend des heures ou quand une donnée incorrecte fait exploser l'installation. Mais l'ingrédient essentiel permettant d'obtenir ces qualités externes réside dans les facteurs internes : pour que les

utilisateurs puissent jouir de ces qualités visibles, les concepteurs et implémenteurs devront appliquer des techniques garantissant ces qualités cachées.

Les chapitres suivants présentent un ensemble de techniques modernes garantissant la qualité interne. Il n'en faudrait pas pour autant oublier l'essentiel ; les techniques internes ne sont pas une fin en soi, mais un moyen d'atteindre les qualités logicielles externes. Il nous faut donc débuter par une analyse de ces facteurs externes.

1.2 RAPPEL DES FACTEURS EXTERNES

Voici les facteurs de qualité externe les plus importants, ceux que vise en premier la construction de logiciels orientés objet.

Correction

Définition : correction

La correction est la capacité que possède un produit logiciel de mener à bien sa tâche, telle qu'elle a été définie par sa spécification.

La correction est la qualité essentielle. Si un système ne fait pas ce qu'il est supposé faire, tout le reste — être rapide, posséder une interface utilisateur agréable… — compte peu.

Mais c'est plus facile à dire qu'à faire. Même la première étape est déjà difficile : nous devons être à même de spécifier de manière précise les besoins du système, ce qui est une tâche passablement ardue.

Les méthodes garantissant la correction seront, en général, **conditionnelles**. Un système logiciel sérieux, même petit d'après les canons actuels, touche à tellement de choses qu'il serait impossible de garantir sa correction en traitant tous ses composants et propriétés sur le même plan. De fait, une approche par couches sera nécessaire, chaque couche se reposant sur celles qui lui sont inférieures :

Couches dans le développement logiciel

Dans cette approche conditionnelle de la correction, nous ne nous préoccupons de garantir la correction d'une couche *que dans l'hypothèse où* celles de niveau inférieur sont correctes. C'est la seule technique réaliste, car elle permet de cerner les problèmes et nous laisse nous concentrer, à chaque étape, sur un ensemble restreint de questions. Vous ne pouvez pas, en pratique, vérifier qu'un programme écrit dans un langage de haut niveau X est correct sans supposer que le compilateur utilisé implémente correctement X. Cela ne veut pas forcément dire que vous devez avoir une confiance aveugle dans le compilateur, mais simplement que

vous décomposez le problème en deux : correction du compilateur et correction de votre programme par rapport à la sémantique du langage.

Dans la méthode décrite dans ce livre, on fait intervenir encore plus de niveaux : le développement logiciel reposera sur des bibliothèques de composants réutilisables, qui peuvent être intégrés dans maintes applications différentes.

Couches dans un processus de développement qui favorise la réutilisation

L'approche conditionnelle s'appliquera également ici : nous devrons nous assurer que les bibliothèques sont correctes et, séparément, vérifier la correction de l'application, celle des bibliothèques étant admises.

Beaucoup de praticiens, quand on aborde la question de la correction du logiciel, pensent test et débogage. Nous pouvons être plus ambitieux : dans les prochains chapitres, nous explorerons un certain nombre de techniques, en particulier le typage et les assertions, qui ont pour mission de faciliter la construction de logiciels corrects dès le début — plutôt que de tenter d'atteindre cette correction par débogage. Débogage et test restent, bien sûr, indispensables comme moyen de vérification supplémentaire du résultat.

Il est possible d'aller encore plus loin et d'adopter une approche complètement formelle de la construction de logiciel. Ce livre ne vise pas un tel objectif, comme le laissent sous-entendre les termes prudents de "vérifier", "garantir" et "assurer" que nous avons utilisés ci-dessus à la place de "prouver". Toutefois, plusieurs techniques décrites dans les chapitres suivants découlent directement des travaux sur les techniques mathématiques utilisées dans les spécifications et vérifications formelles de programmes, et nous rapproche ainsi sensiblement de cet idéal de correction.

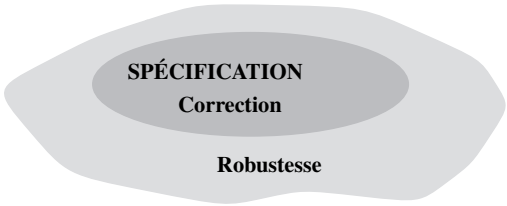
Robustesse

Définition : robustesse

La robustesse est la capacité qu'offrent des systèmes logiciels à réagir de manière appropriée à la présence de conditions anormales.

La robustesse complète la correction. La correction concerne le comportement d'un système dans les cas qui sont conformes à ses spécifications ; la robustesse caractérise ce qui se passe en dehors de cette spécification.

La robustesse par rapport à la correction



Comme le suggère le style littéraire utilisé dans sa définition, la robustesse est une notion par nature plus floue que la correction. Puisque nous nous intéressons ici à des cas qui ne sont pas couverts par la spécification, il n'est pas possible de dire, comme pour la correction, que le système devrait "effectuer son travail" dans de telles conditions ; si ce travail était connu, les cas anormaux deviendraient une partie de la spécification et nous nous retrouverions dans le domaine de la correction.

Sur le traitement des exceptions, voir le chapitre 12.

> Cette définition de "cas anormal" sera à nouveau utile quand nous étudierons le traitement des exceptions. Elle sous-entend que les concepts de normal et d'anormal sont toujours relatifs à une certaine spécification ; un cas anormal correspond simplement à un cas qui n'est pas couvert par la spécification. Si vous étendez les spécifications, les cas qui étaient anormaux deviennent normaux — même s'ils correspondent à des événements, comme l'entrée de données incorrectes, que vous préféreriez éviter. Ici, "normal" ne veut pas dire "désirable", mais simplement "pris en compte lors de la conception du logiciel". Bien qu'il puisse, de prime abord, paraître bizarre de considérer l'entrée d'une donnée erronée comme un cas normal, toute autre approche devrait s'appuyer sur des critères subjectifs et serait donc inutilisable.

Il y aura toujours des cas qui ne seront pas explicitement couverts par une spécification. L'exigence de robustesse a pour objectif de s'assurer que, si de tels cas se présentent, le système ne causera pas de catastrophes ; il devrait fournir des messages d'erreur appropriés ou entrer dans un mode appelé "dégradation harmonieuse".

Extensibilité

Définition : extensibilité

L'extensibilité est la facilité d'adaptation des produits logiciels aux changements de spécifications.

Le logiciel se doit d'être *flexible* et, de fait, l'est, en principe ; rien n'est plus facile à modifier qu'un programme si vous avez accès à son code source. Utilisez simplement votre éditeur de texte.

Le problème de l'extensibilité est un problème d'échelle. Pour de petits programmes, un changement n'est généralement pas une affaire d'état ; mais, au fur et à mesure que le logiciel grossit, il devient de plus en plus difficile à adapter. Un grand système logiciel ressemble, pour ceux qui le maintiennent, à un gigantesque château de cartes dans lequel le retrait d'un élément quelconque peut conduire à l'effondrement de l'édifice tout entier.

Nous avons besoin de l'extensibilité, car la base de tout logiciel repose sur une intervention humaine et son cortège de caprices. Le cas typique des logiciels de gestion (les "systèmes de

gestion de l'information"), dans lesquels la promulgation d'une nouvelle loi ou l'acquisition d'une entreprise peuvent soudainement invalider les hypothèses sur lesquelles repose un système, n'est pas unique ; même dans le cas du calcul numérique, où les lois de la physique ne changent pas d'un mois à l'autre, notre façon de comprendre et de modéliser les systèmes physiques changera.

Les approches traditionnelles du génie logiciel n'ont, jusqu'ici, pas suffisamment pris en compte la notion de changement. Elles ont plutôt privilégié une vision idéale du cycle de vie du logiciel dans laquelle une phase initiale d'analyse gèle, une fois pour toutes, les exigences, le reste du processus étant dévolu à la conception et à l'élaboration d'une solution. Ceci est compréhensible : le premier impératif pour faire progresser cette discipline était de développer des techniques solides permettant d'exprimer et de résoudre des problèmes donnés. On n'envisageait pas les cas où le problème changerait en cours de traitement. Mais, dorénavant, puisque les techniques de base du génie logiciel sont en place, il devient essentiel d'aborder ce point capital. Le changement est omniprésent dans les développements logiciels : changement d'exigences, de notre compréhension de celles-ci, des algorithmes, des modes de représentation de données, des techniques d'implémentation. Prendre en compte le changement est un objectif fondamental de la technologie objet et un thème permanent de ce livre.

Bien que certaines techniques améliorant l'extensibilité puissent être introduites à l'aide de petits exemples ou dans des cours d'initiation, leur pertinence ne se révèle que dans des grands projets. Deux principes sont essentiels à l'amélioration de l'extensibilité :

- *simplicité de conception* : une architecture simple sera toujours plus facile à adapter aux changements.
- *décentralisation* : une modification d'un module aura d'autant moins d'incidence sur les autres modules que celui-ci sera autonome, évitant ainsi le déclenchement d'une réaction en chaîne de changements dans l'ensemble du système.

La méthode orientée objet est, avant toute chose, une méthode d'architecture de systèmes qui aide les concepteurs à concevoir des systèmes dont la structure soit à la fois simple (même dans les grands systèmes) et décentralisée. Simplicité et décentralisation seront des thèmes récurrents des chapitres prochains qui nous conduiront aux principes orientés objet.

Réutilisabilité

Définition : réutilisabilité

La réutilisabilité est la capacité des éléments logiciels à servir à la construction de plusieurs applications différentes.

L'attrait de la réutilisabilité provient du fait que les systèmes logiciels suivent souvent les mêmes modèles ; il devrait être possible d'exploiter ces ressemblances et d'éviter de réinventer des solutions à des problèmes qui se sont déjà posés. En s'inspirant de ces modèles, un élément logiciel réutilisable sera applicable à de nombreux développements différents.

La réutilisabilité influence tous les autres aspects de la qualité du logiciel, car, si le problème de la réutilisabilité est résolu, on aura moins de logiciel à écrire et, donc, plus de temps à

consacrer (à coût constant) à l'amélioration des autres facteurs, comme la correction et la robustesse.

On retrouve ici une problématique que l'approche traditionnelle du cycle de vie du logiciel n'a pas réellement abordée, et ce pour la même raison historique : il faut que vous ayez déjà trouvé les moyens de résoudre un problème avant d'envisager de les appliquer à d'autres problèmes. Mais, avec la croissance du développement logiciel et les efforts déployés pour en faire une véritable industrie, le besoin de réutilisabilité est devenu pressant.

Voir chapitre 4.

La réutilisabilité jouera un rôle central dans les chapitres à venir, l'un d'eux étant, de fait, entièrement dévolu à une analyse fouillée de ce facteur de qualité, ses bénéfices pratiques et les questions qu'il pose.

Compatibilité

Définition : compatibilité

La compatibilité est la facilité avec laquelle des éléments logiciels peuvent être combinés à d'autres.

La compatibilité est importante, car nous ne développons pas les éléments logiciels dans le vide : ils doivent interagir entre eux. Mais des problèmes se produisent souvent au cours de ces interactions parce que les modules font des hypothèses différentes sur le reste du monde. Un exemple en est la grande variété de formats de fichiers incompatibles présents dans les systèmes d'exploitation. Un programme ne peut utiliser le résultat d'un autre en entrée que si leurs formats de fichiers sont compatibles.

L'absence de compatibilité peut mener au désastre. En voici un cas extrême :

San Jose (Calif.) Mercury News, 20 Juillet 1992. Cité dans le forum de discussion Usenet "comp.risks", 13.67, Juillet 1992 (extrait).

> *DALLAS — La semaine dernière, AMR, maison-mère d'American Airlines, Inc., a indiqué avoir échoué dans le projet de développement d'un tout nouveau système de réservation commun à l'ensemble des industries du voyage, incluant également les locations de voitures et les chambres d'hôtels.*
>
> *AMR n'a stoppé le développement de son nouveau système de réservation Confirm que quelques semaines après la date à laquelle celui-ci aurait dû commencer à traiter les premières transactions de ses partenaires Budget Rent-A-Car, Hilton Hotels Corp. et Marriott Corp. L'arrêt de ce projet de 125 millions de dollars, étalé sur 4 ans, s'est traduit pour AMR par une provision pour pertes avant impôts de 165 millions de dollars et a fragilisé la réputation de l'entreprise, présentée comme chef de file dans le secteur du voyage.* […]
>
> *Dès janvier, les dirigeants de Confirm ont découvert que le travail de plus de 200 programmeurs, analystes système et ingénieurs n'avait apparemment servi à rien. Les parties essentielles de ce projet pharaonique — sa description tient dans 47 000 pages — avaient été développées séparément, en utilisant des méthodes différentes. Lorsqu'on les a mises ensemble, elles ne pouvaient pas coopérer.*

> *Les développeurs n'ont pas réussi à connecter ensemble les morceaux. Les différents "modules" ne pouvaient pas extraire l'information requise de chaque coté du canal qui les reliait.*
> *AMR Information Services a licencié huit membres confirmés du projet, dont le chef de projet.* […] *Fin juin, Budget et Hilton ont annoncé qu'ils se retiraient du projet.*

La clé de la compatibilité réside dans l'homogénéité de la conception et dans l'élaboration de conventions standardisées pour les communications interprogrammes. Parmi les approches possibles, on trouve :

- Les formats de fichiers standardisés, comme dans le système de fichiers d'Unix où chaque fichier texte est une simple séquence de caractères.
- Les structures de données standardisées, comme dans les systèmes Lisp où toutes les données, y compris les programmes, sont représentées par des arbres binaires (appelés listes dans Lisp).
- Les interfaces utilisateur standardisées, comme avec les diverses versions de Windows, OS/2 et MacOS dans lesquelles tous les outils reposent sur un paradigme unique de communication avec l'utilisateur, basé sur des composants standard comme les fenêtres, les icônes, les menus, etc.

Des solutions plus générales découlent de la définition de protocoles standardisés d'accès aux entités importantes manipulées par le logiciel. C'est l'idée qui conduit aux types abstraits de données et à l'approche orientée objet, ainsi qu'aux protocoles *middleware* comme CORBA et OLE-COM de Microsoft (ActiveX).

Sur les types abstraits de données, voir chapitre 6.

Efficacité

Définition : efficacité

L'efficacité est la capacité d'un système logiciel à utiliser le minimum de ressources matérielles, que ce soit le temps machine, l'espace occupé en mémoire externe et interne, ou la bande passante des moyens de communication.

Le mot "performance" est souvent utilisé comme synonyme d'efficacité. La communauté du logiciel adopte deux attitudes typiques vis-à-vis de l'efficacité :

- Certains développeurs sont obsédés par les questions de performance, ce qui les pousse à dépenser beaucoup d'efforts dans de soi-disant optimisations.
- Mais une autre faction tend à minimiser l'importance de la performance, comme l'illustrent certains dictons, monnaie courante de la profession, comme "Faites bien les choses avant de les faire vite" ou "De toute façon, l'ordinateur de l'année prochaine sera 50 % plus rapide".

Il n'est pas rare de voir la même personne adopter ces deux attitudes à des moments différents, soit une version logicielle de la schizophrénie (Dr. Abstrait contre Mr. Microseconde).

Où se trouve la vérité ? Certes, les développeurs ont souvent montré un intérêt exagéré pour les micro-optimisations. Comme on l'a déjà vu, l'efficacité n'a pas beaucoup d'importance si le logiciel est incorrect (ce qui suggère un nouveau dicton, "*Ne te préoccupe pas de la vitesse à laquelle ça tourne tant que ce n'est pas correct*", qui ressemble au précédent sans en être exactement l'équivalent). Plus généralement, le souci d'efficacité doit être mis en rapport avec

les autres objectifs que sont l'extensibilité et la réutilisabilité, des optimisations poussées pouvant rendre le logiciel si spécialisé qu'il ne serait plus adaptable ou réutilisable. Qui plus est, la puissance toujours croissante du matériel informatique nous permet d'être un peu plus serein quand il s'agit de gagner un dernier octet ou une ultime microseconde.

Tout ceci, pourtant, ne doit pas minimiser l'efficacité. Personne n'aime attendre les réponses d'un système interactif, ni acheter plus de mémoire pour exécuter un programme. Les attitudes cavalières envers l'efficacité tiennent souvent de l'effet de manche ; si le système se révèle finalement si lent et volumineux qu'il en devient inutilisable, ceux qui soutenaient que "la vitesse importe peu" ne seront pas les derniers à se plaindre.

Ce point révèle ce qui me paraît être une caractéristique essentielle du génie logiciel, laquelle n'est d'ailleurs pas près de disparaître : la construction de logiciels est difficile parce qu'elle demande la prise en compte de maintes exigences différentes, certaines d'entre elles, comme la correction, étant abstraites et conceptuelles alors que d'autres, comme l'efficacité, sont concrètes et liées aux propriétés des matériels informatiques.

Pour certains scientifiques, le développement logiciel est une branche des mathématiques ; pour certains ingénieurs, il s'agit d'une technologie appliquée. En fait, c'est un peu les deux à la fois. L'ingénieur logiciel doit concilier les concepts abstraits et leur application concrète, ainsi que les mathématiques du calcul correct et les contraintes de temps et d'espace qui découlent des lois physiques et des limitations de la technologie matérielle actuelle. Faire plaisir à la fois aux anges et aux démons constitue peut-être le défi clé du génie logiciel.

L'accroissement constant de la puissance de calcul, si impressionnante soit-elle, n'est pas une excuse pour mépriser l'efficacité, et ce pour au moins trois raisons :

- Quiconque achète un ordinateur plus gros et plus rapide espère retirer un bénéfice substantiel de cette puissance supplémentaire — pour aborder de nouveaux problèmes, traiter plus rapidement des problèmes anciens ou résoudre des cas plus complexes dans le même laps de temps. Utiliser un nouvel ordinateur pour traiter les problèmes précédents sans gain de temps n'impressionnera personne !
- Une des retombées les plus marquantes de l'accroissement de la puissance de calcul est d'*accentuer* l'avance des algorithmes efficaces par rapport aux autres. Supposons que la nouvelle machine soit deux fois plus rapide que la précédente. Soit n la taille du problème à résoudre et N la valeur maximum de n pouvant être traitée en un temps donné. Alors, si l'algorithme est en O (n), c'est-à-dire s'il tourne en un temps qui est proportionnel à n, la nouvelle machine vous permettra d'aborder des problèmes de taille environ $2 * N$ si N est suffisamment grand. Pour un algorithme en O (n^2) la nouvelle machine ne permettra qu'un accroissement de 41% de N. Un algorithme en O (2^n), similaire à ces algorithmes combinatoires qui font une recherche exhaustive des solutions, incrémenterait seulement N de un — votre retour sur investissement serait, pour le moins, limité.
- Dans certains cas, l'efficacité peut influencer la correction. Une spécification peut exiger que la réponse de l'ordinateur à un événement donné se produise dans un certain délai ; par exemple, un ordinateur de bord doit être prêt à détecter et à traiter un message provenant du détecteur de manette des gaz en un temps suffisamment court pour permettre une action correctrice. Cette relation entre efficacité et correction n'est pas limitée aux seules applications communément considérées comme "temps réel" ; peu de gens seront intéressés

par un modèle de prévision météorologique qui prend vingt-quatre heures pour prévoir le temps du lendemain.

> Voici un autre exemple, peut-être moins crucial, qui m'a souvent embêté : un système de fenêtrage que j'ai utilisé pendant un certain temps était parfois trop lent à détecter que le pointeur de la souris avait été déplacé d'une fenêtre à une autre et, en conséquence, les caractères tapés au clavier, qui concernaient une fenêtre donnée, se retrouvaient parfois dans une autre.
>
> Ici, la limitation de performance entraîne une violation de la spécification, c'est-à-dire de la correction, ce qui, même dans des applications banales de tous les jours, peut avoir des conséquences fâcheuses : pensez à ce qui peut arriver si les deux fenêtres sont utilisées pour envoyer du courrier électronique à deux correspondants différents. Des mariages ont été annulés, et même des guerres déclenchées, pour moins que ça.

Puisque ce livre est centré sur les concepts du génie logiciel orienté objet, seuls quelques passages traitent explicitement de l'impact qu'auront ceux-ci sur les performances. Mais le souci de performance sera omniprésent. Chaque fois que l'étude introduira une solution orientée objet d'un problème, on veillera à ce que cette solution soit non seulement élégante, mais aussi efficace ; chaque fois qu'un nouveau mécanisme orienté objet sera introduit, qu'il s'agisse du ramasse-miettes (ou d'autres approches de gestion mémoire pour calculs orientés objet), de la liaison dynamique, de la généricité ou de l'héritage répété, il le sera avec la garantie de pouvoir être implémenté à un coût raisonnable en temps et espace ; et chaque fois que cela sera approprié, les conséquences sur les performances des techniques étudiées seront mentionnées.

L'efficacité n'est qu'un des facteurs de qualité ; nous ne devrions pas (comme le font certains dans la profession) nous laisser guider par elle. Mais il doit néanmoins être pris en considération, que ce soit lors de la construction d'un système logiciel ou dans la conception d'un langage de programmation. Si vous répudiez la performance, la performance vous répudiera.

Portabilité

Définition : portabilité

La portabilité est la facilité avec laquelle des produits logiciels peuvent être transférés d'un environnement logiciel ou matériel à un autre.

La portabilité traite des différences non seulement entre matériels physiques distincts, mais, plus généralement, entre diverses **machines matérielles-logicielles**, celles que nous programmons en pratique, y compris les systèmes d'exploitation, éventuellement les systèmes de fenêtrage et autres outils de base. Dans le reste de ce livre, le mot "plate-forme" sera utilisé pour désigner un type de machine matérielle-logicielle ; un exemple de plate-forme est "Intel X86 sous Windows NT" (connu sous le nom "Wintel").

Une grande partie des incompatibilités entre plate-formes n'est pas justifiée et, pour un observateur naïf, la seule explication possible consiste parfois à envisager l'existence d'une conspiration visant à brimer l'humanité, en général, et les programmeurs, en particulier. Quelle qu'en soit cependant la cause, cette diversité fait que la portabilité reste une préoccupation majeure des développeurs et des utilisateurs de logiciel.

Facilité d'utilisation

Définition : facilité d'utilisation

La facilité d'utilisation est la facilité avec laquelle des personnes présentant des formations et des compétences différentes peuvent apprendre à utiliser les produits logiciels et à s'en servir pour résoudre des problèmes. Elle recouvre également la facilité d'installation, d'opération et de contrôle.

La définition insiste sur les différences de compétence des utilisateurs potentiels. Cette exigence présente un défi majeur aux concepteurs de logiciel qui se préoccupent de facilité d'utilisation : comment fournir une aide et des explications détaillées à des utilisateurs inexpérimentés, tout en évitant d'ennuyer les utilisateurs plus aguerris qui veulent aller directement à l'essentiel ?

Comme pour beaucoup d'autres qualités étudiées dans ce chapitre, une des clés permettant de faciliter l'utilisation est la simplicité de structure. Un système bien conçu, construit selon une structure claire et bien pensée, sera plus facile à apprendre et à utiliser qu'un autre construit n'importe comment. Cette condition n'est pas suffisante, bien sûr (ce qui est simple et clair pour le concepteur peut être complexe et obscur pour les utilisateurs, en particulier si les explications sont données dans des termes propres au concepteur et non à l'utilisateur), mais cela aide considérablement.

C'est un des domaines dans lesquels la méthode orientée objet est particulièrement productive ; plusieurs techniques OO, qui semblent de prime abord se limiter à la conception et à l'implémentation, fournissent également des idées d'interface qui facilitent la vie des utilisateurs finaux. Les chapitres à venir en fourniront plusieurs exemples.

Voir Wilfred J. Hansen, "User Engineering Principles for Interactive Systems", Proceedings of FJCC 39, AFIPS Press, Montvale (NJ), 1971, pages 523-532.

Les concepteurs logiciels concernés par la facilité d'utilisation devront se méfier du précepte le plus souvent cité dans la littérature afférente aux interfaces homme-machine, et tiré d'un article précurseur de Hansen : ***Connais l'utilisateur***. L'argument est qu'un bon concepteur doit faire l'effort de comprendre la communauté présumée des utilisateurs du système. Ce point de vue ignore une des caractéristiques des systèmes ayant connu un certain succès : ils vont toujours au-delà de leur audience initiale. (Deux exemples anciens et célèbres sont Fortran, conçu comme un outil permettant de résoudre les problèmes d'une petite communauté d'ingénieurs et de scientifiques qui programmaient un IBM 704, et Unix, prévu pour un usage interne aux Bell Laboratories.) Un système conçu pour un groupe spécifique sera fondé sur des hypothèses qui ne seront plus valables pour une audience plus large.

Les bons concepteurs d'interface utilisateur adoptent une politique plus prudente. Ils font le minimum d'hypothèses possibles concernant leurs utilisateurs. Quand vous concevez un système interactif, vous pouvez supposer que les utilisateurs sont des membres de la race humaine et qu'ils savent lire, déplacer une souris, cliquer sur un bouton et taper (lentement) sur un clavier ; pas beaucoup plus. Si le logiciel concerne un domaine d'application spécialisé, vous pouvez peut-être supposer que l'utilisateur est au courant de ses principes de base. Mais même cela est risqué. Pour renverser, en le paraphrasant, le conseil de Hansen :

Principe de conception d'interface utilisateur

Ne prétendez pas connaître l'utilisateur ; vous ne le connaissez pas.

Fonctionnalité

Définition : fonctionnalité

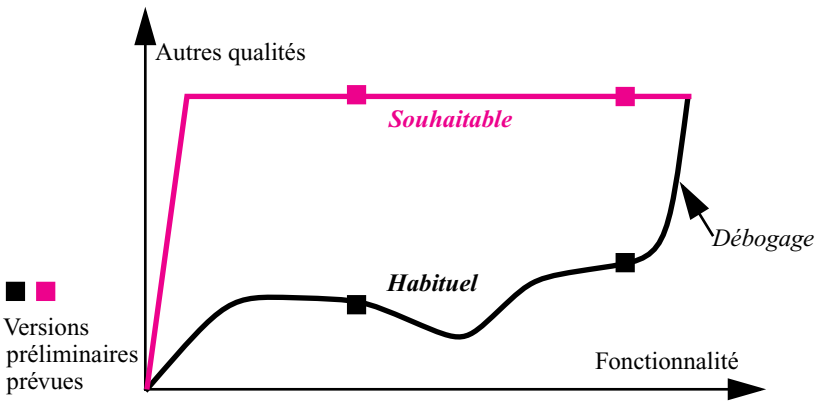
La fonctionnalité est l'étendue des possibilités offertes par un système.

Un des problèmes les plus ardus que rencontre un chef de projet est de déterminer le niveau de fonctionnalité qui suffit. L'incitation à ajouter toujours plus de choses, connue dans le jargon de l'industrie par l'expression de *course aux options* (*featurism*) (souvent "*course larvée aux options*"), est toujours vivace. Ses conséquences sont fâcheuses dans les projets internes, où la pression vient des utilisateurs à l'intérieur d'une même entreprise, et plus encore dans les produits commerciaux, car la partie la plus visible d'une étude comparative effectuée par un journaliste est souvent un tableau récapitulant, côte à côte, les caractéristiques offertes par les produits concurrents.

La course aux options combine, en fait, deux problèmes, l'un plus difficile que l'autre. Le problème le plus simple est la perte de cohérence qui peut résulter de l'ajout de nouveaux gadgets, gênant la facilité d'utilisation. En effet, les utilisateurs ont tendance à se plaindre que tous les "gadgets" (*bells and whistles*) de la nouvelle version d'un produit le rendent extrêmement complexe. Ces commentaires ne devraient pas néanmoins être pris au pied de la lettre, car ces nouveaux gadgets ne viennent pas du néant : ils ont été, la plupart du temps, demandés par les utilisateurs — d'*autres* utilisateurs. Ce qui m'apparaît comme une bagatelle superflue peut être, pour vous, un outil indispensable.

La solution consiste, ici, à s'efforcer de maintenir la cohérence globale du produit en essayant de faire tout tenir dans un moule général. Un bon produit logiciel est basé sur un petit nombre d'idées puissantes ; même s'il y a beaucoup de détails spécifiques, on devrait pouvoir tous les considérer comme dérivant de ces concepts de base. Le "plan général" doit rester visible et tout devrait y avoir sa place.

Le problème le plus difficile est d'éviter d'être tellement obnubilé par les détails que l'on en oublie les autres qualités. Les projets tombent fréquemment dans ce piège, une situation illustrée clairement par Roger Osmond sous la forme des deux parcours possibles vers l'achèvement d'un projet :



***Courbes d'Osmond* ; *d'après* [Osmond 1995]**

La courbe du bas (en noir) est malheureusement trop fréquente : dans la course frénétique à l'ajout de nouvelles fonctionnalités, le développement perd de vue la qualité globale. La phase finale, dont le but est d'obtenir que tout soit comme il faut, peut être longue et stressante. Si, sous la pression des utilisateurs ou des concurrents, vous êtes obligé d'avancer la diffusion des produits — aux moments indiqués par des carrés noirs sur le dessin — le résultat peut nuire à votre réputation.

Osmond suggère (courbe en grisé), grâce aux techniques d'amélioration de la qualité qu'offre le développement OO, de maintenir un niveau constant de qualité, sous tous ses aspects hormis la fonctionnalité, durant l'ensemble du projet. Vous refusez ainsi de compromettre fiabilité, extensibilité et autres : vous n'introduisez de nouvelles fonctions que lorsque vous êtes satisfait de celles dont vous disposez.

Cette méthode est plus difficile à appliquer du fait des pressions mentionnées, mais fournit un processus de développement logiciel plus efficace et, souvent, un meilleur produit final. Même si le résultat est le même, comme le suggère la figure, il devrait être atteint plus tôt (bien que le dessin ne mentionne pas le temps). Suivre le chemin suggéré ne rend peut-être pas plus facile la décision de lancer des versions préliminaires — les points indiqués par des carrés gris dans le dessin — mais la rend du moins plus simple : il vous suffira d'estimer si ce que vous avez déjà correspond à une part suffisante de l'ensemble des fonctionnalités, permettant d'attirer un consommateur potentiel plutôt que de le faire fuir. La question "est-ce suffisamment bon" (sous-entendu, "est-ce que cela ne va pas se planter") ne devrait pas être un facteur.

Comme le sait n'importe quel lecteur ayant élaboré un projet logiciel, il est plus facile d'énoncer un tel conseil que de le suivre. Mais chaque projet devrait s'efforcer d'appliquer l'approche représentée par la meilleure des deux courbes d'Osmond. Cela s'intègre bien avec le *modèle de groupe*, présenté dans un prochain chapitre comme un modèle général de développement orienté objet rigoureux.

Ponctualité

Définition : ponctualité

La ponctualité est la capacité d'un système logiciel à être livré au moment désiré par ses utilisateurs, ou avant.

La ponctualité est source d'une des plus grandes frustrations de notre industrie. Un superbe produit logiciel qui arrive trop tard peut complètement rater sa cible. C'est également vrai dans d'autres industries, mais peu évoluent aussi vite que celle du logiciel.

"NT 4.0 Beats Clock", Computer-World, vol. 30, n° 30, 22 juillet 1996.

La ponctualité est encore, pour les grands projets, un phénomène peu fréquent. Quand Microsoft a annoncé que la dernière version de son principal système d'exploitation serait livrée, après plusieurs années de travail, avec un mois d'avance, l'événement a suscité un tel intérêt qu'il a fait la une de *ComputerWorld* dans un article évoquant les retards importants de projets plus anciens.

Autres qualités

D'autres qualités, en plus de celles évoquées jusqu'à présent, affectent les utilisateurs de systèmes logiciels, ainsi que ceux qui achètent ces systèmes ou commandent leur développement. En particulier :

- La **vérifiabilité** est la facilité à préparer les procédures de recette, en particulier les jeux de tests, ainsi que les procédures permettant de détecter les erreurs et de les faire remonter, lors des phases de validation et d'opération, aux défauts dont elles proviennent.
- L'**intégrité** est la capacité que présentent certains systèmes logiciels à protéger leurs divers composants (programmes, données) contre les accès et modifications non autorisés.
- La **réparabilité** est la capacité à faciliter la réparation des défauts.
- L'**économie**, cousine de la ponctualité, est la capacité d'un système à être terminé dans les limites de son budget, ou en deçà.

À propos de la documentation

Dans une liste des facteurs de qualité du logiciel, on peut s'attendre à trouver l'exigence d'une bonne documentation. Mais ce n'est pas un facteur de qualité isolé ; le besoin de documentation est plutôt une conséquence des autres facteurs de qualité décrits ci-dessus. Nous pouvons distinguer trois sortes de documentation :

- La documentation *externe*, qui permet aux utilisateurs de maîtriser la puissance du système et de l'utiliser correctement ; c'est une conséquence de la définition de la facilité d'utilisation.
- La documentation *interne*, qui permet aux développeurs logiciels de comprendre la structure et l'implémentation du système ; c'est une conséquence de l'exigence d'extensibilité.
- La documentation d'*interface de modules*, qui permet aux développeurs logiciels de comprendre les fonctionnalités offertes par un module sans avoir à en comprendre l'implémentation ; c'est une conséquence de l'exigence de réutilisabilité. Elle se déduit aussi de l'extensibilité, puisque la documentation d'interface de modules permet de déterminer si un changement donné doit avoir un impact sur un module précis.

Plutôt que de traiter la documentation comme un produit séparé du logiciel proprement dit, il est préférable de rendre le logiciel aussi autodocumenté que possible. Ceci s'applique aux trois types de documentation :

- En incluant des mécanismes d'"aide" en ligne et en suivant des conventions claires et cohérentes d'interface utilisateur, vous simplifiez la tâche des auteurs de manuels utilisateur et autres formes de documentations externes.
- Un bon langage d'implémentation éliminera une grande partie du besoin de documentation interne s'il favorise une expression claire et structurée. Cela sera l'une des exigences principales de la notation orientée objet développée tout le long de ce livre.
- La notation introduira la rétention d'information, ainsi que d'autres techniques (comme les assertions), en vue de séparer l'interface des modules de leur implémentation. Il est alors possible d'utiliser des outils pour produire automatiquement la documentation d'interface de

modules à partir du texte des modules. Cet outil constitue l'un des sujets abordés en détail dans les chapitres suivants.

Toutes ces techniques diminuent le rôle de la documentation traditionnelle, quoique nous ne puissions évidemment pas espérer nous en passer complètement.

Compromis

Dans ce survol des facteurs externes de qualité du logiciel, nous avons rencontré certaines exigences qui sont incompatibles avec d'autres.

Comment peut-on obtenir l'*intégrité* sans introduire des protections diverses, ce qui limitera inévitablement la *facilité d'utilisation* ? L'*économie* paraît souvent s'opposer à la *fonctionnalité*. L'*efficacité* optimale nécessiterait une adaptation parfaite à un environnement matériel et logiciel donné, ce qui est opposé à la *portabilité,* et à une spécification, alors que la *réutilisabilité* incite à résoudre des problèmes plus généraux que celui donné initialement. Les impératifs de *ponctualité* peuvent nous faire pencher vers l'utilisation de techniques de "développement rapide d'applications" (RAD) dont les résultats risquent de ne pas permettre beaucoup d'*extensibilité*.

Bien qu'il soit possible, dans de nombreux cas, de trouver une solution conciliant apparemment ces facteurs contradictoires, vous serez parfois amené à faire des compromis. Trop souvent, les développeurs font ces compromis de manière implicite, sans prendre le temps de considérer les divers aspects et choix disponibles ; l'efficacité tend à être le facteur dominant dans ces décisions impromptues. L'approche basée sur le génie logiciel imposera un effort d'explicitation de ces critères avant qu'un choix ne soit fait en connaissance de cause.

Aussi nécessaires que soient les compromis entre facteurs de qualité, un facteur reste prééminent : la correction. On ne peut justifier de compromettre la correction au profit d'autres intérêts comme l'efficacité. Si le logiciel ne remplit pas sa fonction, le reste est sans utilité.

Préoccupations essentielles

Toutes les qualités évoquées ci-dessus sont importantes. Mais, dans l'état actuel de l'industrie du logiciel, quatre d'entre elles sont primordiales :

- *correction* et *robustesse* : il est encore trop difficile de produire un logiciel sans défauts (bogues) et trop pénible de corriger ces défauts, une fois ceux-ci introduits. Les techniques permettant d'améliorer la correction et la robustesse sont proches : approches plus systématiques de la construction du logiciel ; spécifications plus formelles ; vérifications introduites tout au long du processus de construction du logiciel (et pas seulement lors du test et du débogage après coup) ; meilleurs mécanismes de langage comme le typage statique, les assertions, la gestion automatique de la mémoire et le traitement rigoureux des exceptions, qui permettent aux développeurs d'exprimer des exigences de correction et de robustesse et d'utiliser des outils de détection des incohérences avant que celles-ci n'entraînent des défauts. Du fait de la proximité des concepts de correction et de robustesse, il est commode d'utiliser un mot unique plus général, la **fiabilité**, pour se référer à ces deux facteurs.

- *extensibilité* et *réutilisabilité* : le logiciel devrait être plus facile à modifier ; les éléments logiciels que nous produisons devraient être applicables de manière plus générale et il devrait exister un répertoire plus vaste de composants d'utilisation générale que nous pourrions réutiliser lors du développement de nouveaux systèmes. Ici également, des idées voisines sont utiles pour améliorer ces deux qualités : toute technique qui facilite la production d'architectures plus décentralisées, dans lesquelles les composants sont auto-suffisants et ne communiquent qu'à travers des canaux restreints et bien définis, sera bénéfique. Le terme de **modularité** couvrira à la fois réutilisabilité et extensibilité.

Comme nous le verrons en détail dans les chapitres suivants, la méthode orientée objet peut significativement améliorer ces quatre facteurs de qualité — ce qui explique pourquoi elle est si attirante. Elle contribue de façon significative à d'autres aspects, en particulier :

- *compatibilité* : la méthode favorise un style unifié de conception, ainsi que des interfaces standardisées entre modules et systèmes, ce qui permet de produire des systèmes qui travailleront de concert.
- *portabilité* : avec l'accent mis sur les concepts d'abstraction et de rétention d'information, la technologie objet encourage les concepteurs à distinguer les propriétés de spécification de celles d'implémentation, diminuant ainsi les efforts de portage. Les techniques de polymorphisme et de liaison dynamique rendront même possible la réalisation de systèmes qui s'adaptent automatiquement aux divers composants de la machine matérielle-logicielle, par exemple à des systèmes de fenêtrage ou à des systèmes de gestion de bases de données différents.
- *facilité d'utilisation* : la contribution des outils OO aux systèmes interactifs modernes et, en particulier, à leurs interfaces utilisateur est bien connue, à tel point qu'elle occulte parfois ses autres aspects (les publicistes ne sont pas les seuls à appeler "orienté objet" tout système qui utilise des icones, des fenêtres et des souris).
- *efficacité* : comme indiqué ci-dessus et bien que la puissance supplémentaire des techniques orientées objet puisse paraître, de prime abord, coûteuse, se fier à des composants réutilisables de qualité professionnelle peut souvent améliorer considérablement les performances.
- *ponctualité*, *économie* et *fonctionnalité* : les techniques OO permettent à ceux qui les maîtrisent de produire du logiciel plus rapidement et à un coût moindre ; elles facilitent l'ajout de fonctions et peuvent elles-mêmes en suggérer de nouvelles fonctions.

Malgré toutes ces améliorations, nous devons garder à l'esprit que la méthode orientée objet n'est pas une panacée et que les questions habituelles du génie logiciel restent en grande partie d'actualité. Aider à préciser un problème n'est pas le résoudre.

1.3 DE LA MAINTENANCE LOGICIELLE

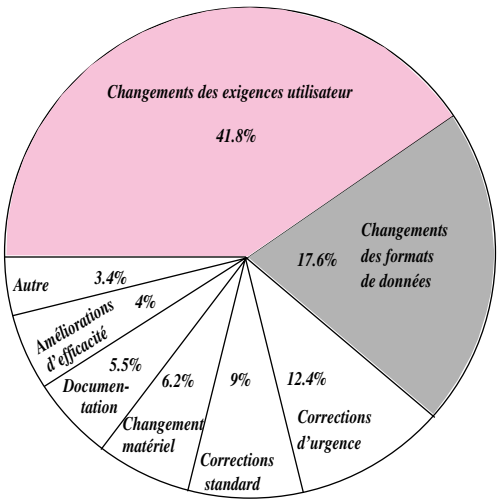
La liste de facteurs ne mentionne pas une qualité souvent citée : la maintenabilité. Pour comprendre pourquoi, nous devons approfondir la notion sous-jacente de maintenance.

La maintenance représente ce qui se passe après qu'un produit logiciel a été diffusé. Les discussions de méthodologie logicielle ont tendance à se focaliser sur la phase de développement ; même chose pour les cours d'introduction à la programmation. Mais on

estime couramment que 70 % du coût du logiciel est dévolu à la maintenance. Aucune étude sur la qualité du logiciel ne peut être complète si elle néglige cet aspect.

Que représente la "maintenance" d'un logiciel ? Une minute de réflexion montre que ce terme n'est pas approprié : un produit logiciel ne s'use pas à force d'usages répétés et ne nécessite donc pas d'être "entretenu" comme doit l'être une voiture ou une télévision. En fait, le mot est utilisé par les gens du logiciel pour désigner tout à la fois des activités nobles et d'autres qui le sont moins. La partie noble représente la modification : quand les spécifications des systèmes informatiques changent, reflétant en cela les modifications du monde extérieur, les systèmes doivent également changer. La partie moins noble est le débogage tardif : éliminer les erreurs qui n'auraient pas dû être là. Le schéma ci-dessous, tiré d'une étude de Lientz et Swanson qui a fait date, illustre ce que recouvre le terme général de maintenance. L'étude a concerné 487 installations qui produisaient du logiciel de toutes sortes ; bien qu'elle soit un peu ancienne, des publications plus récentes ont confirmé l'essentiel des résultats. Elle montre le pourcentage des coûts de maintenance alloués à chacune des activités de maintenance identifiées par les auteurs.

***Répartition des coûts de maintenance. Source* : [Lientz 1980]**



Plus des deux cinquièmes du coût sont dévolus à des modifications ou extensions requises par les utilisateurs. Cela correspond à la partie noble de la maintenance que nous avons décrite ci-dessus, et c'en est aussi la partie inévitable. Il faudrait voir quelle économie pourrait réaliser l'industrie du logiciel si celle-ci construisait ses produits en montrant, dès le début, plus de considération pour l'extensibilité. Nous pouvons légitimement nous attendre, ici, à une aide de la technologie objet.

Pour un autre exemple, voir "Quelle est la longueur de la seconde initiale ?", page 129.

Le second poste, par ordre décroissant de coût, est particulièrement intéressant : l'effet des changements de formats de données. Quand la structure physique des fichiers et autres types de données change, les programmes doivent être adaptés. Par exemple, quand les services postaux américains ont introduit, il y a quelques années, les codes postaux "5 + 4" pour les grandes entreprises (en utilisant neuf chiffres au lieu de cinq), de nombreux programmes qui traitaient des adresses et "savaient" qu'un code postal est formé d'exactement cinq chiffres ont du être réécrits, pour un coût de l'ordre de plusieurs centaines de millions de dollars, selon la presse.

> De nombreux lecteurs auront sans doute reçu les belles brochures présentant un ensemble de conférences — pas un événement unique, mais une séquence de sessions dans plusieurs villes — dédiées au "problème du millénaire" : comment s'y prendre pour mettre à jour la myriade de programmes qui manipulent des dates et dont les auteurs n'ont jamais imaginé un seul instant qu'une date puisse exister au-delà du XX^{e} siècle ? L'effort d'adaptation du code postal est une plaisanterie à côté de ça. Jorge Luis Borges aurait aimé l'idée : étant donné que peu de gens se préoccupent de ce qui se passera le 1er janvier 3000, ceci doit être le sujet le plus minuscule auquel a été consacrée une série de conférences, ou même une seule conférence, dans toute l'histoire de l'humanité, venue et à venir : *un simple chiffre décimal*.

Le problème n'est pas qu'une partie d'un programme connaisse la structure physique des données : c'est inévitable, puisque les données doivent bien finir par être traitées de manière interne. Mais, avec les techniques traditionnelles de conception, cette connaissance est distribuée dans trop de parties du système, ce qui conduit à des changements de programme dont l'importance est difficile à justifier quand la structure physique change — ce qui arrivera forcément. En d'autres termes, si les codes postaux passent de cinq à neuf chiffres ou si la date demande un chiffre de plus, on peut concevoir qu'un programme qui manipule les codes ou les dates doive être adapté ; ce qui n'est pas acceptable, c'est que la connaissance de la longueur exacte de ces données soit placardée à travers tout le programme et que changer cette longueur impose des changements de programmes sans commune mesure avec la taille conceptuelle du changement de la spécification.

La théorie des types abstraits de données fournira la clé de ce problème en permettant aux programmes d'accéder aux données via des propriétés externes plutôt qu'à travers leur implémentation physique.

Le chapitre 6 couvre les types abstraits de données en détail.

Un autre aspect marquant de la distribution des activités est le faible pourcentage (5,5 %) des coûts de documentation. Rappelez-vous qu'il s'agit des coûts des tâches effectuées au moment de la maintenance. Il semble ici — disons plutôt qu'il semblerait, en l'absence de données plus spécifiques — que la documentation d'un projet sera élaborée soit au moment du développement, soit pas du tout. Nous apprendrons à utiliser un style de conception intégrant la documentation dans le logiciel et disposant d'outils spéciaux pour l'extraire.

Les postes suivants de la liste de Lientz et Swanson sont aussi intéressants, quoique moins directement liés au sujet de ce livre. Les réparations de bogues d'urgence (faites en hâte quand un utilisateur prévient qu'un programme ne produit pas les résultats escomptés ou se comporte de manière catastrophique) coûtent plus que les corrections de routine planifiées. Et ce non seulement parce qu'elles doivent être effectuées en conditions de stress, mais aussi parce qu'elles perturbent le processus bien huilé de diffusion des nouvelles versions et peuvent introduire de nouvelles erreurs. Les deux derniers postes ne comptabilisent que des pourcentages faibles :

- L'amélioration de l'efficacité ; il semblerait que, quand un système marche, les chefs de projets et programmeurs sont peu enclins à le perturber dans l'espoir d'améliorer sa performance et préfèrent le laisser tel quel. (Quand on pense au dicton "Faites bien les choses avant de les faire vite", beaucoup de chefs de projet sont probablement déjà contents d'arriver à la première étape.)
- Le "transfert vers un nouvel environnement" correspond également à un pourcentage faible. Une interprétation possible (à nouveau une conjecture, en l'absence de données plus précises) est qu'il y a essentiellement deux sortes de programmes quand on considère la

question de la portabilité, et pas grand-chose en dehors de ces deux extrêmes : certains programmes sont conçus avec un impératif de portabilité et leur portage coûte relativement peu ; les autres sont tellement liés à leur plate-forme d'origine, et seraient tellement difficiles à porter, que les développeurs n'essaient même pas.

1.4 CONCEPTS CLÉS INTRODUITS DANS CE CHAPITRE

- Le but du génie logiciel est de trouver des moyens permettant de construire des logiciels de qualité.
- Plutôt qu'un facteur unique, la qualité dans le logiciel se conçoit d'avantage comme un compromis entre plusieurs objectifs.
- Les facteurs externes, perceptibles aux utilisateurs et clients, devraient être distingués des facteurs internes, perceptibles aux concepteurs et implémenteurs.
- Seuls comptent les facteurs externes, mais ils ne peuvent être obtenus qu'à l'aide des facteurs internes.
- Une liste des facteurs de base de qualité a été présentée. Ceux qui manquent le plus au logiciel d'aujourd'hui, et que la méthode orientée objet vise directement, sont les facteurs de sûreté comme la correction et la robustesse, réunis sous le vocable de fiabilité, et les facteurs qui requièrent des architectures logicielles plus décentralisées : réutilisabilité et extensibilité, connus sous le terme commun de modularité.
- La maintenance du logiciel, qui correspond à une part importante des coûts du logiciel, est pénalisée par les difficultés d'implémentation des changements des produits logiciels et par la dépendance exagérée des programmes envers la structure physique des données qu'ils manipulent.

1.5 NOTES BIBLIOGRAPHIQUES

De nombreux auteurs ont proposé des définitions de la qualité du logiciel. Parmi les premiers articles sur le sujet, deux, en particulier, restent aujourd'hui d'actualité : [Hoare 1972], un article éditorial invité, et [Boehm 1978], résultat d'une des premières études systématiques, par un groupe à TRW.

La distinction entre les facteurs internes et externes a été introduite dans une étude commanditée par l'US Air Force à General Electric en 1977 [McCall 1977]. McCall utilise les termes "facteurs" et "critères" pour ce que nous avons appelé, dans ce chapitre, facteurs externes et internes. La plupart des facteurs introduits dans ce chapitre (mais pas tous) correspondent à ceux de McCall ; l'un de ses facteurs, maintenabilité, a été éliminé car, comme indiqué ci-dessus, il est couvert de manière adéquate par l'extensibilité et la vérifiabilité. L'étude de McCall évoque non seulement les facteurs externes, mais aussi un certain nombre de facteurs internes ("critères"), ainsi que des *métriques*, techniques quantitatives permettant d'estimer le taux de satisfaction des facteurs internes. Avec la technologie objet, pourtant, un certain nombre de ces facteurs internes et métriques sont obsolètes, car trop liés à des pratiques

logicielles anciennes. Étendre cette partie des travaux de McCall aux techniques développées dans ce livre serait un projet utile ; voir la bibliographie et les exercices du chapitre 3.

L'argument concernant l'effet relatif des améliorations des machines sur la complexité des algorithmes est dérivé de [Aho 1974].

Une référence standard en matière de facilité d'utilisation est [Shneiderman 1987], améliorant [Shneiderman 1980] qui était dévolu au sujet plus large de la psychologie logicielle. La page Web du laboratoire de Shneiderman à *http://www.cs.umd.edu/projects/hcil/* contient un grand nombre de références bibliographiques sur ces sujets.

Les courbes d'Osmond sont tirées d'un tutoriel donné par Roger Osmond à TOOLS USA [Osmond 1995]. À noter que la forme donnée dans ce chapitre ne prend pas en compte le temps, permettant ainsi, sur les deux courbes possibles, une vue plus directe du compromis entre la fonctionnalité et les autres qualités, mais n'indiquant pas le risque de retard du projet que présente la courbe en noir. Les courbes originelles d'Osmond sont exprimées en fonction du temps plutôt que de la fonctionnalité.

Le diagramme des coûts de maintenance est dérivé d'une étude de Lientz et Swanson basée sur un questionnaire concernant la maintenance et envoyé à 487 organisations [Lientz 1980]. Voir aussi [Boehm 1979]. Bien que leurs données de base puissent être considérées comme trop spécialisées et obsolètes de nos jours (l'étude était basée sur des applications de gestion de l'information par lot d'environ 23 000 instructions en moyenne, taille importante à l'époque mais qui ne l'est plus de nos jours), les résultats semblent toujours applicables dans leurs grandes lignes. La Software Management Association réalise une revue annuelle de la maintenance ; voir [Dekleva 1992] pour un rapport concernant l'une des ces revues.

Les expressions *programming-in-the-large* et *programming-in-the-small* ont été introduites par [DeRemer 1976].

Pour une discussion générale sur les questions touchant au génie logiciel, voir le livre de Ghezzi, Jazayeri et Mandrioli [Ghezzi 1991]. Un ouvrage sur les langages de programmation par certains de ces auteurs, [Ghezzi 1997], fournit des renseignements supplémentaires sur certaines des questions abordées dans ce livre.