Développement formel par composants : assemblage et vérification à l'aide de B

Arnaud Lanoix* — **Samuel Colin*** — **Jeanine Souquières***

* *LORIA – Nancy Université*
Campus Scientifique, BP 239
F-54506 Vandœuvre lès Nancy cedex
{Firstname.Lastname}@loria.fr

RÉSUMÉ. *Dans une approche composants pour le développement de logiciels, les composants sont considérés comme des boîtes noires. Une application consiste en un assemblage de composants qui communiquent via leurs interfaces. Une description formelle de ces interfaces est nécessaire pour s'assurer de leur compatibilité. En général, les interfaces ne sont pas directement compatibles et un adaptateur doit être introduit. Nous proposons des schémas pour assembler des composants de manière systématique et vérifier leur interopérabilité; ces schémas sont définis à l'aide de concepts issus de la méthode B. L'assemblage est un raffinement des interfaces requises qui inclut les interfaces fournies; la correction du processus est validée par les obligations de preuves usuelles.*

ABSTRACT. *In a software component-based development approach, components are considered as black boxes. A component-based application consists of assembled components which communicate by the means of their interfaces. A formal description of these interfaces is therefore required to check their compatibility. In general, interfaces are not directly compatible and an adapter is required to bridge the gap. We propose patterns to assemble components in a systematic manner and verify their interoperability; these patterns are defined using B concepts. The assembly is a refinement of the required interfaces, including the provided interfaces; the process correctness is validated by the usual proof obligations.*

MOTS-CLÉS : *composant, adaptateur, assemblage, interface, vérification, construction sûre, raffinement.*

KEYWORDS: *component, adapter, assembly, interface, verification, trustworthy development, refinement*

2e soumission à *Technique et Science Informatiques*, le 25 mai 2008

1. Introduction

L'approche conception de systèmes par assemblage de composants est une approche de développement intéressante et de plus en plus adoptée (Szyperski, 1999). Une application à composants consiste en une composition de composants : des composants logiciels "boîte noire" développés par ailleurs sont assemblés les uns avec les autres pour produire le système complet. Le processus d'assemblage sous-jacent est similaire à celui des méthodes de construction et de réutilisation développées dans d'autres disciplines comme le génie mécanique ou le génie électrique.

Les composants sont assemblés via leurs interfaces. Une interface *fournie* par un composant peut être connectée avec une interface *requise* d'un autre composant si la première offre toutes les fonctionnalités permettant d'implanter la seconde : les composants doivent être connectés de manière appropriée. Afin de garantir cette *interopérabilité* entre composants, nous considérons chaque connexion entre interfaces fournie et requise de l'architecture et montrons que les interfaces sont compatibles. Une description appropriée des interfaces est primordiale si l'on veut vérifier que l'assemblage est correct.

Il est bien connu que la correction d'une connexion peut s'exprimer en termes de raffinement : l'interface fournie doit raffiner l'interface requise. La spécification formelle des interfaces et la preuve de leur interopérabilité en utilisant la méthode formelle B a été étudiée dans (Chouali *et al.*, 2006; Hatebur *et al.*, 2006). Grâce à B, nous prouvons que le modèle de l'interface fournie est un *raffinement* correct de l'interface requise ; en d'autres termes, nous prouvons que l'interface fournie correspond à une implantation correcte de l'interface requise et par conséquent, que les composants peuvent être connectés.

Dans une approche de réutilisation, ceci est insuffisant : les composants existants ont rarement des interfaces fournies qui raffinent directement l'interface requise du composant auquel on veut le connecter. Il faut bien souvent intercaler un adaptateur (ou médiateur) entre les deux composants pour les rendre compatibles ou bien encore développer un nouveau composant par assemblage de plusieurs composants existants afin de répondre au besoin. Une première étude portant sur la construction d'adaptateurs et de leur preuve dans le cas d'une seule interface est décrite dans (Mouakher *et al.*, 2006). L'objet du présent article est d'affiner et d'étendre ce travail par une étude plus globale des différents cas d'assemblages possibles dans une architecture à base de composants. Chaque cas a donné lieu à la définition d'un schéma d'assemblage. De plus, nous montrons comment combiner ces schémas avec la mise en correspondance des modèles de données (Colin *et al.*, 2007), lorsque cela est nécessaire. Nous décrivons les différents schémas d'assemblages de composants à l'aide d'UML et de B, permettant ainsi d'obtenir des obligations de preuve de correction de l'assemblage.

L'article est structuré de la manière suivante. La section 2 présente notre approche et l'utilisation de la méthode B. La section 3 présente différents types d'assemblage et pour chacun d'eux, un schéma d'architecture et son squelette en B permettant d'exprimer et de vérifier la correction de l'assemblage. Le problème particulier de la mise en correspondance de modèles de données est abordé dans la section 4. La section 5 illustre notre démarche avec le développement d'une étude de cas d'un système de contrôle d'accès à un bâtiment. Des travaux connexes sont discutés dans la section 6 et une conclusion avec des perspectives d'évolution termine cet article.

2. Description de l'approche et utilisation de B

Dans notre approche composants, l'architecture du système est modélisée à l'aide de différents diagrammes UML 2.0 (OMG, 2005) :

– les diagrammes de structure composite pour exprimer l'architecture globale du système en termes des composants et des interfaces à connecter ;

– les diagrammes de classes pour exprimer les modèles de données et les signatures des méthodes des interfaces ;

– les diagrammes de séquences pour exprimer les interactions possibles entre composants et décrire des protocoles d'usage complexe.

Le comportement autorisé ou attendu des interfaces est décrit à l'aide de modèles B.

2.1. *B et son utilisation dans notre approche*

B (Abrial, 1996) est une méthode formelle basée sur la théorie des ensembles, permettant un développement incrémental grâce au raffinement. Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

– Des fondations mathématiques en logique du premier ordre avec *théorie des ensembles*, qui forment un corpus formel connu et compris depuis longtemps

– La *modularité* qui aide au développement par morceaux de systèmes complexes

– Le *raffinement* pour un développement incrémental du niveau de détail, ainsi que pour la génération de code.

La méthode B a été appliquée avec succès dans le développement d'applications réelles complexes, comme le projet METEOR (Behm *et al.*, 1999) ou le métro Val (Badeau *et al.*, 2005). Elle s'appuie sur des outils robustes (Steria, 1998; Clearsy, 2004).

Nous rappelons ici comment un modèle est développé grâce à la méthode B.

2.1.1. *Construire un modèle B*

```
MODEL example
SEES seen_model
INCLUDES included_model
VARIABLES var1, var2
INVARIANT inv
INITIALISATION init
OPERATIONS
 out1, out2 ⟵ method1(in1, in2) ≙
 PRE pre1
 THEN body1
 END
END
```

Figure 1 – Schéma de modèle B

Le principe d'un modèle tient dans l'expression de propriétés du système qui doivent rester vraies après toute étape d'évolution du modèle. La correction du modèle signifie la préservation de ces propriétés.

Les propriétés sont spécifiées dans la clause **INVARIANT** du modèle et l'évolution de celui-ci est spécifiée dans plusieurs opérations situées dans la clause **OPERATIONS**. Soit le modèle générique présenté figure 1 : il dispose de variables var1 et var2 dont les propriétés sont indiquées dans l'invariant inv. Le modèle contient une opération method1 qui précise comment var1 et var2 peuvent changer, avec la possibilité d'orienter ce changement

via les paramètres de l'opération. method1 peut aussi retourner une ou plusieurs valeurs. La précondition pre1 de method1 permet d'indiquer quels sont les types et contraintes sur les paramètres et les variables du modèle lors de l'appel de l'opération. Le corps de l'opération body1 est spécifié selon la syntaxe du langage des substitutions de B, qui sont très similaires au calcul des plus faibles préconditions de Dijkstra (Dijkstra, 1976).

Les autres clauses du modèle générique de la figure 1 ont trait à la modularité : seen_model de la clause **SEES** est un modèle B qui peut être vu mais dont l'état ne peut pas être modifié. included_model de la clause **INCLUDES** est un autre modèle B dont l'état est visible et dont les changements peuvent être contrôlés en appelant ses opérations.

Parmi les autres clauses non présentes dans la figure 1 nous pouvons citer la clause **CONSTANTS** qui permet de spécifier les constantes du système. Il est à noter que B étant basé sur la théorie des ensembles, les variables et les constantes peuvent elles-mêmes être des ensembles, et donc en particulier des relations simples voire des fonctions. Dans ce cas, nous parlerons de variable fonctionnelle ou de constante fonctionnelle, respectivement.

Parmi les autres clauses liées à la modularité, la clause **PROMOTES** permet de réutiliser une ou plusieurs opérations d'un modèle inclus en assimilant celles-ci à la machine incluante. La clause **EXTENDS** va plus loin en permettant de reprendre tout le contenu d'un autre modèle, i.e. si M étend N, alors toutes les variables, constantes, opérations définies dans N sont comme «recopiées» dans M.

2.1.2. *Verifier un modèle B*

Comme indiqué précédemment, vérifier un modèle B signifie que chaque opération préserve les propriétés du modèle. Si l'on suppose que le modèle est initialisé selon un état qui préserve ces propriétés, et que les opérations sont appelées en respectant leurs préconditions, alors l'état résultant du modèle après appel d'une opération préserve également ces propriétés. Ainsi, pour l'opération method1, cela correspond à vérifier que $\mathsf{inv} \wedge \mathsf{pre1} \Rightarrow [\mathsf{body1}]\mathsf{inv}$.

La notation [body1]inv doit se lire : «les plus faibles hypothèses pour que body1 établisse inv». Pour obtenir ces hypothèses, il faut calculer l'expression précédente. Sans entrer dans les détails, ce calcul est très proche de celui de Dijkstra, mentionné plus haut. Au final, si l'on sait que $\mathsf{plus\_faibles\_hypotheses} \Rightarrow [\mathsf{body1}]\mathsf{inv}$, alors vérifier le modèle pour l'opération method1 signifie prouver la formule $\mathsf{inv} \wedge \mathsf{pre1} \Rightarrow \mathsf{plus\_faibles\_hypotheses}$. Cette étape se fait idéalement avec un outil de preuve de théorèmes.

2.1.3. *Raffiner et implanter un modèle B*

L'une des grandes forces de la méthode B est le développement incrémental : elle permet de spécifier des propriétés très générales et abstraites dans une première étape et de les raffiner dans les étapes suivantes. Le *raffinement* d'un modèle B, indiqué par l'en-tête de modèle **REFINEMENT**, rend celui-ci plus déterministe et plus précis jusqu'à ce que le code des opérations puisse être implanté dans un langage de programmation donné (C ou Ada). Ce dernier niveau est appelé *implantation* et est indiqué en B par l'en-tête de modèle **IMPLEMENTATION**.

Un raffinement est spécifié par la clause **REFINES** qui indique quel autre modèle ou raffinement sert de base. Construire le reste du raffinement est similaire à la construction d'une machine abstraite, et la vérification nécessite la preuve de formules, bien qu'il y ait ici une différence. En effet, plutôt que de prouver que l'invariant est préservé, comme pour un modèle abstrait, il s'agit de prouver que les opérations raffinées ne contredisent pas leurs versions plus abstraites.

La dernière étape d'implantation ajoute des contraintes sur le raffinement : toutes les constantes utilisées doivent avoir des valeurs concrètes explicitées, i.e. si une constante est décrite uniquement en compréhension à un niveau abstrait, il faudra donner sa valeur explicite dans l'implantation, comme par exemple énumérer ses éléments s'il s'agit d'un ensemble. De plus, certaines substitutions deviennent interdites dans les opérations (choix indéterministes, substitutions en parallèle). L'implantation apporte aussi la possibilité d'introduire des boucles. La clause **INCLUDES** est remplacée par la clause **IMPORTS** similaire, à quelques contraintes près sur le modèle *importé*. Une fois l'étape d'implantation atteinte, il n'est plus possible de raffiner le modèle obtenu.

2.1.4. *Apports de la méthode B pour notre approche*

Dans notre approche, les interfaces des composants sont annotées de modèles B pour exprimer le comportement implanté (dans le cas d'une interface fournie) ou attendu (dans le cas d'une interface requise) par l'interface. Deux notions clés de la méthode B sont utilisées :

– le raffinement qui permet un développement incrémental avec préservation de la correction à chaque étape du développement,

– les mécanismes de composition, permettant un développement modulaire et la vérification de la correction lors de l'appel d'opérations.

Dans un processus de développement intégré, les modèles B pourraient être obtenus en appliquant des règles systématiques de transformation de UML vers B (Meyer *et al.*, 1999; Ledang *et al.*, 2001).

L'état actuel du développement de la plate-forme Rodin (RODIN, 2007) pour le B événementiel ne propose pas encore de mécanismes de (dé)composition, ce qui nous empêche d'évoluer vers cette nouvelle plate-forme.

2.2. *Interopérabilité entre composants*

Un composant *propose* par le biais d'une interface(s) *fournie*(s) les services ou les méthodes qu'il réalise. De manière réciproque, un composant exprime ses besoins en termes de services ou de méthodes via une (des) interface(s) *requise*(s). Une interface *fournie* par un composant peut être connectée avec l'interface *requise* d'un autre composant si la première propose toutes les fonctionnalités permettant de répondre aux besoins exprimés par la seconde. On dit alors que les composants considérés sont *interopérables* et nous exprimons la correction de la connexion en termes d'un raffinement B (Chouali *et al.*, 2006).

Définition. Soient deux composants OTS1[1] et OTS2 tels que OTS1 *requiert* une interface RI_ots1 et OTS2 *fournit* une interface PI_ots2. Ils sont interopérables si et seulement si le modèle B de PI_ots2 est un *raffinement* de celui de RI_ots1.

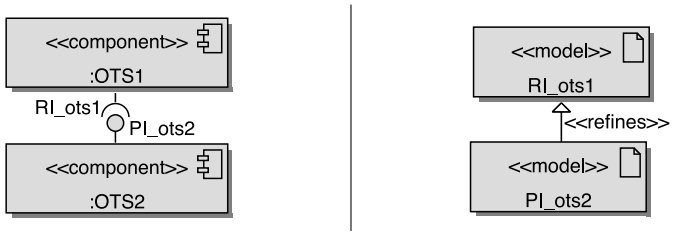


Figure 2 – Interopérabilité entre OTS1 et OTS2

Lorsque l'interface fournie offre plus de fonctionnalités que n'en nécessite l'interface requise, un simple raffinement n'est plus possible, de par les contraintes posées sur le raffinement de modèles en B. L'assemblage s'effectuera alors selon un assemblage simple comme présenté en section 3.1.

Lors d'un développement par composants, les problèmes suivants doivent être étudiés : vérifier que deux composants sont *interopérables*, sinon développer un adaptateur ; développer un nouveau composant à partir de composants existants.

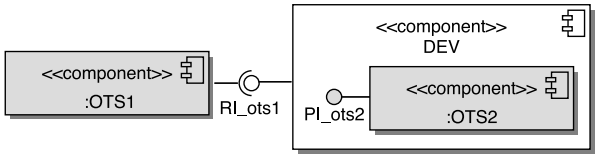


Figure 3 – Adaptation vue comme le développement d'un nouveau composant

Développer un adaptateur qui assure la bonne connexion entre un composant OTS1 et un composant OTS2, revient à développer un nouveau composant DEV qui fournira l'interface RI_ots1 en utilisant le composant OTS2 via son interface fournie PI_ots2, comme illustré figure 3.

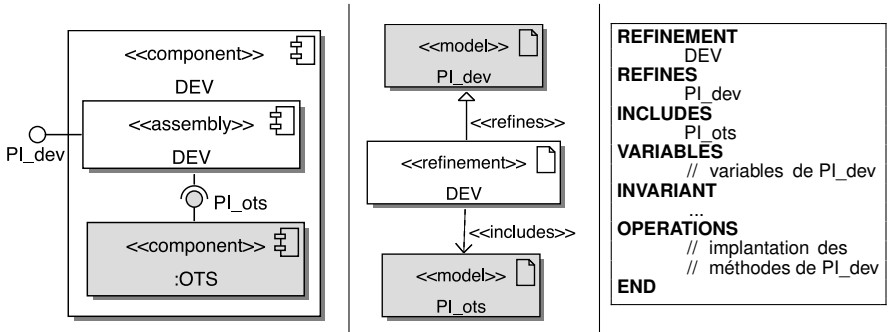
3. Différents assemblages de composants

Dans une approche de réutilisation, les composants existants ont rarement des interfaces directement compatibles. Un "nouveau" composant est nécessaire pour les rendre compatibles. Le développement de ce composant peut être plus ou moins complexe, en fonction du nombre et du type de composants existants à assembler. Nous étudions différents cas d'architecture et proposons des schémas pour assembler un ou plusieurs composants et vérifier la correction de l'assemblage.

1. Nous nommons les composants existants OTS pour "Off-The-Shelf".

3.1. *Cas de base : une seule interface dans l'assemblage*

Examinons la construction d'un composant DEV qui doit implanter une interface PI_dev. Il utilisera un composant existant OTS via son interface fournie PI_ots. Cette construction correspond à un *assemblage* qui exprime comment les attributs et les méthodes de l'interface PI_dev sont implantés à l'aide de ceux de PI_ots.



(a) Architecture UML (b) Architecture B (c) Squelette B de DEV

Figure 4 – Cas de base

1) chaque attribut de PI_dev est exprimé en termes des attributs de PI_ots ;

2) chaque méthode de PI_dev est exprimée par un appel à la méthode pertinente de PI_ots, de par les contraintes de la méthode B sur les appels d'opération

DEV est défini à l'aide d'un raffinement B, permettant de prouver la correction de l'assemblage. Cela implique qu'il n'est pas possible d'ajouter d'autres méthodes, seules celles provenant de PI_dev peuvent être ré-exprimée. Il est en revanche possible d'enrichir l'état de l'assemblage en ajoutant de nouvelles variables : cela serait cependant dépasser le cadre du simple assemblage.

Notons que les contraintes sur les appels d'opérations en B dont il est fait mention plus haut imposent que le protocole de l'interface requise doit être relativement «compatible» avec celui de l'interface fournie. Ces contraintes de B peuvent être handicapantes pour le développement, par exemple un choix borné entre deux appels d'opérations ne peut pas casser l'invariant d'une machine abstraite incluse, mais est néanmoins interdit car il contient plus d'un appel d'opération à la même machine incluse. Il est néanmoins possible d'alléger ces contraintes en suivant les approches de travaux récents tels ceux de Boulmé & Potet (Boulmé *et al.*, 2007).

Nous proposons figure 4 un schéma d'assemblage illustrant l'architecture UML, les relations entre modèles B, ainsi qu'un squelette pour le modèle B de DEV. Les clauses VARIABLES, INVARIANT et OPERATIONS de ce squelette sont à compléter en accord avec les règles *1)* et *2)* énoncées ci-dessus.

La vérification des obligations de preuve assure que le modèle B de DEV

– *raffine* le modèle B associé à l'interface PI_dev (preuve de raffinement),

– en *incluant* correctement le modèle B associé à l'interface PI_ots, i.e. les propriétés de PI_ots suffisent pour établir les propriétés de PI_dev,

c.à.d. que l'assemblage est correct au sens ou il réalise les besoins exprimés par PI_dev.

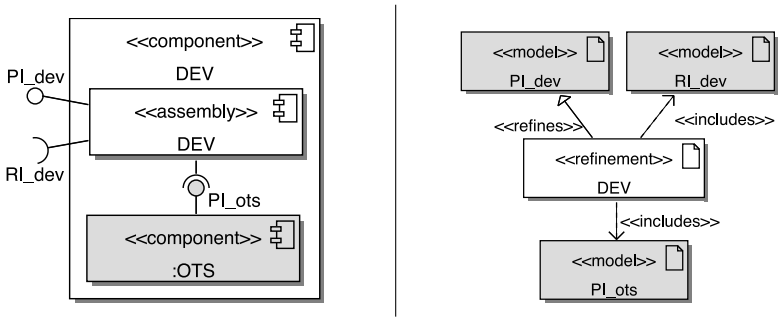


Figure 5 – Cas de base étendu

Il est possible que DEV requière une interface RI_dev. Cette interface exprime des besoins qu'il restera à implanter pour utiliser DEV. Néanmoins, DEV peut utiliser les attributs et les méthodes fournis par RI_dev (au même titre que ceux fournis par PI_ots) pour implanter PI_dev. Dans ce cas, le schéma d'assemblage devient celui proposé figure 5.

3.2. *Cas de deux interfaces dans l'assemblage*

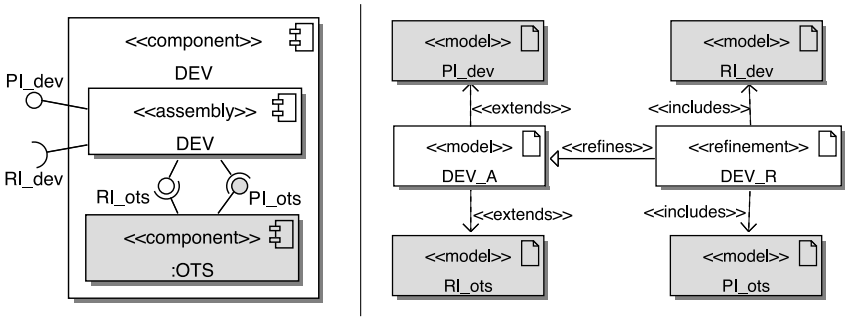


Figure 6 – Deux interfaces dans l'assemblage

Considérons maintenant le cas où le composant à utiliser requiert aussi une interface RI_ots pour implanter correctement les fonctionnalités fournies par PI_ots. Dans ce cas, DEV devra implanter l'interface RI_ots (pour répondre à OTS) en plus de l'interface PI_dev. La construction de DEV nécessite deux étapes de développement comme illustré figure 6 :

– introduction d'un modèle abstrait DEV_A qui *étend* les interfaces à implanter PI_dev et RI_ots pour les regrouper dans un seul modèle B[2] ;

2. Ce modèle intermédiaire est nécessaire parce que le B classique n'autorise le raffinement que d'un seul modèle à la fois.

– définition d'un modèle DEV_R qui exprime l'assemblage. Il raffine DEV_A en incluant les modèles B des interfaces à utiliser, ici RI_dev et PI_ots, afin d'assurer que toutes les fonctionnalités à implanter le sont de manière correcte.

3.3. *Cas général : assemblage de plusieurs composants*

Nous généralisons notre démarche à l'assemblage de plusieurs composants qui fournissent et/ou requièrent des interfaces particulières afin de construire un nouveau composant. DEV doit réaliser l'ensemble des interfaces requises des composants à l'aide de leurs interfaces fournies. La figure 7 donne le schéma d'assemblage dans le cas de deux composants OTS1 et OTS2.

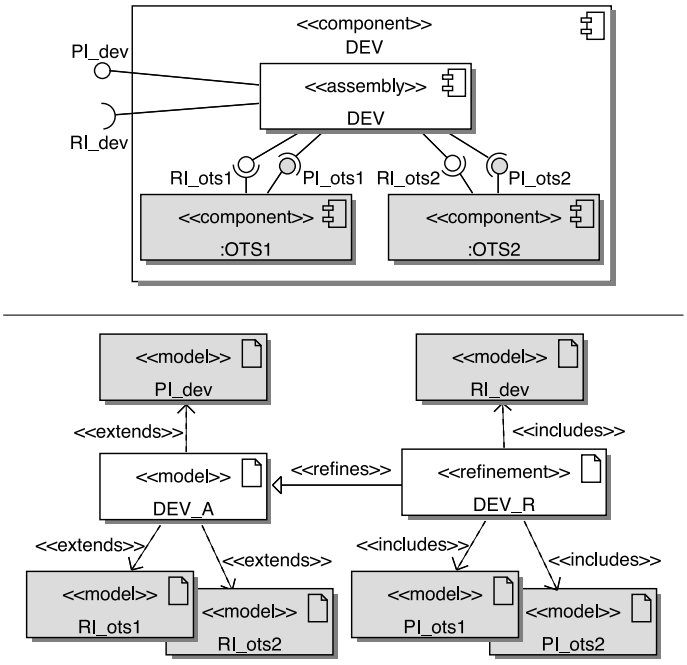


Figure 7 – Assemblage de plusieurs composants

Comme plusieurs composants sont en jeu, le protocole d'appels aux méthodes des interfaces fournies peut être complexe, par exemple une méthode fournie de PI_dev peut utiliser une séquence d'appels à des méthodes fournies par PI_ots1 et PI_ots2. Cette séquence d'appels peut être exprimée à l'aide de diagrammes de séquences UML 2.0 lui-même traduit en B pour ajout dans le composant d'assemblage. La section 5.4 montre un exemple de traduction d'un tel protocole d'appels complexe.

Nous pouvons également remarquer que B propose un mécanisme de renommage associé à la clause INCLUDES qui permet d'utiliser, dans un assemblage de composants, plusieurs instances d'un même composant via des interfaces fournies identiques.

3.4. *Raffinement versus implantation en B*

Il est à noter que le raffinement (clause REFINEMENT) pourrait être une implantation (clause IMPLANTATION). L'avantage principal est de conclure définitivement l'adaptation de manière claire, en proposant un modèle réellement *implanté* en termes des composants utilisés. Les inconvénients sont en revanche plus nombreux :

– L'adaptation est définitive, ce qui signifie qu'il ne sera plus possible de préciser ou d'optimiser l'utilisation des composants fournis. En ce sens, ne pas aller jusqu'à l'implantatation laisse la possibilité à des optimisations, ou des complémentations futures avec d'autres composants, par exemple

– Il faut prendre en compte les contraintes de construction de B : les variables utilisées dans l'implantation doivent être déclarées comme concrètes, donc explicitées. Cela n'est a priori pas garanti puisque les modèles B attachés aux interfaces sont abstraits, et donc en général ne garantissent pas que les constantes qu'ils définissent sont concrètes au sens B du terme. Les modèles utilisés doivent être *importés* plutôt qu'inclus.

– Les constantes (fonctionnelles) introduites tout au long du raffinement doivent être valuées, i.e. il est nécessaire de leur donner une valeur concrète. Lorsque ces constantes se basent sur des ensembles abstraits, donc dont les éléments ne sont pas connus, la valuation n'est possible que si ces ensembles sont isomorphes à des sous-ensembles des entiers naturels. Cela signifie donc que les ensembles abstraits doivent pouvoir être remplacés par des sous-ensembles des entiers naturels.

Cela imposerait d'utiliser les hypothèses de bonne formation des ensembles abstraits pour construire les valeurs concrètes de ces constantes fonctionnelles. Cela est possible en B événementiel du fait de l'obligation d'explicitation des propriétés des ensembles porteurs introduits ; cela n'est pas possible en B classique car celles-ci sont implicites.

– Dans le cas où les éléments des ensembles de base sont énumérés (et donc explicités), les constantes fonctionnelles peuvent être décrites. En revanche, les outils de preuve utilisés ont montré un changement de comportement, en ce sens qu'ils tentaient d'utiliser les valeurs concrètes de ces ensembles et relations pour la preuve, vraisemblablement en faisant la vérification de manière exhaustive pour chacune de ces valeurs. Il en a résulté une preuve des raffinements plus difficile que s'il s'agissait d'ensembles abstraits décrits par leurs seules propriétés, pour lesquels les théorèmes généraux du prouveur étaient plus efficaces.

En conclusion, ces inconvénients, qui pour la plupart se situent au niveau pratique plutôt que théorique, ont fait que nous avons choisi le raffinement.

4. Mise en correspondance des modèles de données

Il n'est pas toujours facile de réaliser chaque attribut à implanter en termes des attributs fournis, en particulier lorsque les modèles de données des interfaces PI_dev et PI_ots sont différents (figure 4(a)). Pour exprimer et vérifier cette correspondance, nous procédons par étapes successives, en utilisant le mécanisme de raffinement de B. DEV est développé par une série de raffinements successifs. Il est initialisé, au niveau le plus abstrait, par le modèle B de l'interface requise et se termine avec l'in-

clusion du modèle B de l'interface fournie. Le processus d'adaptation des modèles B se décompose en trois grandes étapes de raffinement. Une première étude a été menée dans (Colin *et al.*, 2007). Le schéma des modèles B de DEV est détaillé Figure 8.

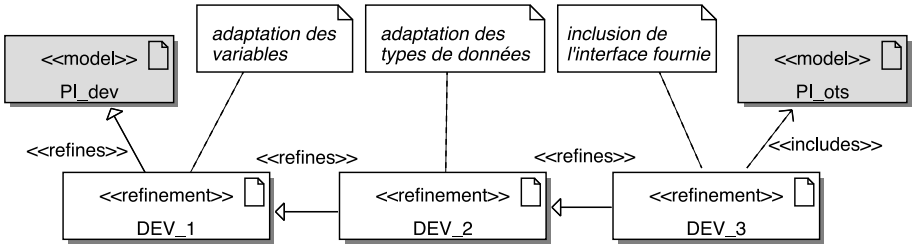


Figure 8 – Étapes pour la mise en correspondance de PI_dev avec PI_ots

1) Adaptation des variables. Cette étape prépare la mise en correspondance entre les attributs de PI_dev et ceux de PI_ots :

– de nouvelles variables, qui ré-expriment les variables de PI_dev sont introduites. Elles sont choisies afin de faciliter la mise en correspondance avec celles de PI_ots ;

– le corps de chaque opération de PI_dev est transformé pour prendre en compte ces nouvelles variables.

2) Adaptation des types de données. Cette étape correspond au transtypage des données :

– les variables introduites à l'étape précédente sont toujours exprimées en termes des types de données de PI_dev. Des fonctions de transtypage sont introduites afin de convertir les types de données de PI_dev vers ceux de PI_ots, et réciproquement. De nouvelles variables sont également introduites par l'application des fonctions de transtypage sur les variables introduites à l'étape précédente ;

– le corps de chaque opération de PI_dev est transformé pour tenir compte des modifications introduites sur les variables.

3) Inclusion de l'interface fournie. Les deux étapes précédentes ont servi à préparer cette dernière étape qui consiste à inclure le modèle B de l'interface fournie :

– puisque les variables de PI_dev ont été ré-exprimées et que les types de données ont été transformés, il est maintenant facile de mettre en correspondance les variables (modifiées) de PI_dev avec celles de PI_ots ;

– chaque opération de PI_dev est exprimée en termes d'appels aux opérations de PI_ots.

Ce processus de développement en trois étapes aide à construire l'assemblage, mais aussi à réaliser la preuve de l'adaptation. La preuve complète est facilitée par la décomposition en plusieurs étapes : il est plus facile de démontrer successivement chacune des étapes de l'adaptation plutôt que de démontrer l'ensemble des preuves en une seule étape. Il faut également souligner que les trois étapes ne sont pas toujours toutes nécessaires et qu'il est quelquefois plus facile de subdiviser l'une d'entre elles en plusieurs raffinements, toujours pour faciliter la preuve.

5. Etude de cas : le système de contrôle d'accès

Nous illustrons notre propos à l'aide d'une version simplifiée de l'étude de cas du contrôle d'accès à un ensemble de bâtiments (AFADL'2000, 2000). L'objectif est de développer un système chargé de contrôler l'accès de personnes autorisées à un bâtiment donné d'un lieu de travail. Nous utilisons notre approche et les différents schémas d'assemblage proposés pour développer ce système à l'aide de composants préexistants.

5.1. *Le cahier des charges*

Le contrôle d'accès s'effectue sur la base de l'autorisation que chaque personne concernée possède. Cette autorisation doit lui permettre, sous le contrôle du système, d'entrer dans le bâtiment. Le nombre de personnes présentes dans le bâtiment doit être connu à tout instant.

Chaque personne autorisée dispose d'une carte d'accès avec un code. Des lecteurs de cartes sont installés à chaque entrée du bâtiment. À proximité de chaque lecteur se trouvent deux voyants, un rouge et un vert, chacun d'eux pouvant être allumé ou éteint. À chaque entrée et sortie du bâtiment se trouve un tourniquet normalement bloqué. Lorsqu'un tourniquet est débloqué par le système, le passage d'une personne est détecté par un capteur. Chaque tourniquet n'est affecté qu'à une seule tâche, entrer ou sortir. L'entrée obéit au protocole suivant :

– si la personne est autorisée à entrer dans le bâtiment, le voyant vert s'allume et le tourniquet se débloque. Le cahier des charges originel fait état d'une contrainte de temps sur la durée de déblocage, contrainte que nous avons préféré abstraire en supposant qu'elle était gérée par le tourniquet lui-même. Dès que la personne franchit le tourniquet, le voyant vert s'éteint et le tourniquet se bloque immédiatement. Si la carte n'a pas été reprise par la personne au bout d'un certain laps de temps, elle est «avalée» par le lecteur ;

– si la personne n'est pas autorisée à entrer dans le bâtiment, le voyant rouge s'allume et le tourniquet reste bloqué. Ici encore, le retrait de la carte est soumis à une durée limite au-delà de laquelle la carte est «avalée» par le lecteur.

Une personne est toujours autorisée à sortir.

5.2. *Une architecture composants*

Dans une approche développement par composants, le système de contrôle d'accès peut être représenté par AccessControl, présenté figure 9. Les besoins auxquels ce système doit répondre sont exprimés à l'aide des interfaces suivantes :

– RI_Database permettra au contrôleur d'envoyer des requêtes à une base de données contenant les autorisations des usagers et des informations sur les personnes présentes dans les bâtiments ;

– RI_Entry permettra au contrôleur d'accès de commander le blocage/déblocage de l'entrée ; l'interface PI_Entry informera le contrôleur du passage d'une personne ;

– PI_Exit informera le contrôleur lorsqu'une personne sortira du bâtiment. Les sorties étant toujours autorisées, le contrôleur n'aura pas besoin de commander le blocage/déblocage de la sortie, d'où l'abscence de RI_Exit ;

– PI_Ident et RI_Ident devront proposer l'ensemble des fonctionnalités liées à l'identification par le contrôleur d'accès. Celui-ci commandera le système d'identification par le biais de l'interface RI_Ident et recevra des informations en retour via PI_Ident.

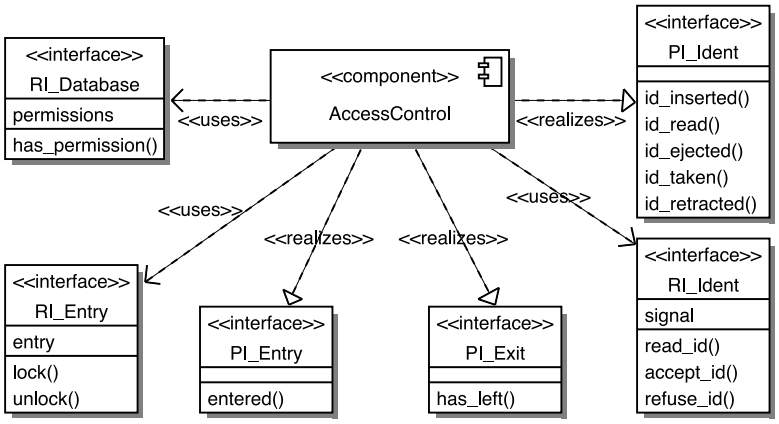


Figure 9 – AccessControl et ses interfaces

Un modèle B est associé à chacune de ces interfaces afin d'exprimer de manière précise les comportements et le protocole d'usage requis par le cahier des charges. À titre d'exemple, les modèles B de RI_Entry et RI_Database sont présentés figures 13 et 19.

5.2.1. *Composants existants*

Pour répondre aux besoins exprimés par AccessControl, nous disposons des composants présentés figure 10 :

– DBNetwork décrit un pilote permettant de connecter une base de données via son interface PI_DBNet. Le modèle B associé est proposé figure 19 ;

– Turnstile fournit un pilote chargé de commander un tourniquet. L'interface PI_Turn fournit des méthodes pour commander l'ouverture et la fermeture du tourniquet ; son modèle B est donné figure 13 ; RI_Turn propose une méthode pour informer du passage d'une personne ;

– CardReader fournit un pilote de lecteur de cartes. Ses deux interfaces PI_Reader et RI_Reader correspondent à l'interfaçage entre le lecteur de cartes et son environnement ;

– Light décrit le pilote de commande d'une lampe. Son interface PI_Light permet d'allumer et d'éteindre la lampe.

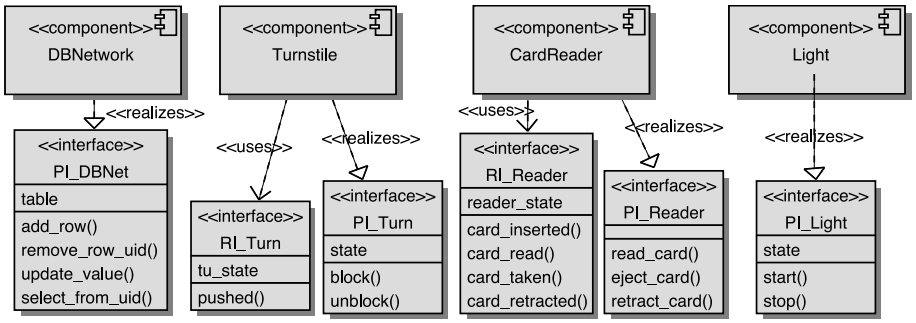


Figure 10 – Les composants DBNetwork, Turnstile, CardReader et Light

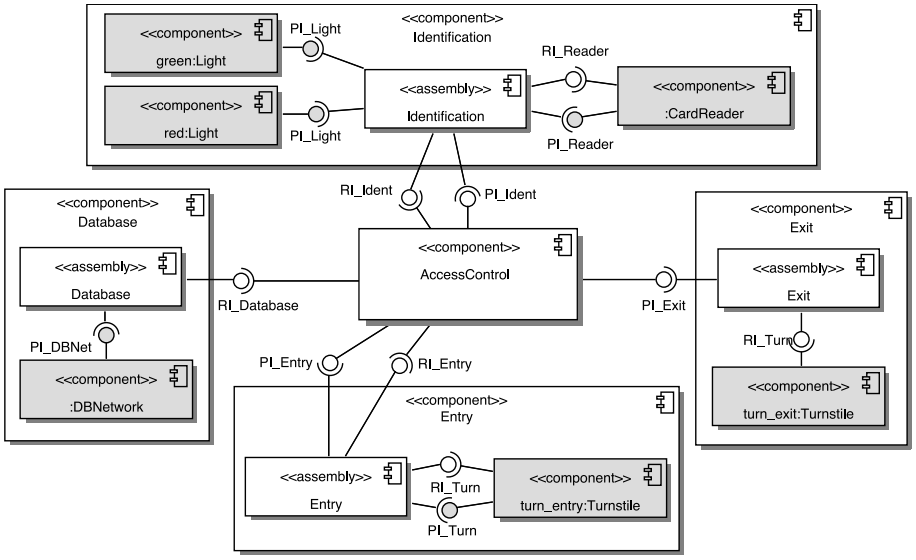


Figure 11 – Architecture globale du système de contrôle d'accès

5.2.2. *Architecture globale*

L'architecture globale du système est décrite Figure 11 sous la forme d'un diagramme de structure composite UML. Pour répondre aux besoins exprimés par AccessControl en utilisant les composants existants présentés dans la section 5.2.1, il est nécessaire de développer des composants intermédiaires, qui assembleront (adapteront) ces composants pour répondre aux besoins : Entry, Exit, Identification et Database. Deux instances de Turnstile, notées turn_entry et turn_exit – pour l'entrée et la sortie du bâtiment – ainsi que deux instances de Light, notées red et green – pour les deux voyants rouge et vert – seront nécessaires.

Dans la suite du papier, nous détaillons le développement des composants Entry, Database et Identification.

5.3. *Le composant* Entry

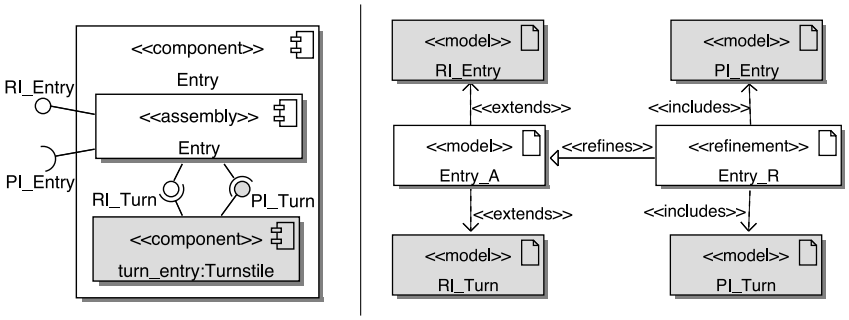


Figure 12 – Composant Entry

Un adaptateur est nécessaire pour connecter AccessControl (via RI_Entry et PI_Entry) au composant Turnstile (via RI_Turn et PI_Turn). L'application du schéma correspondant au cas de deux interfaces dans l'assemblage donne l'architecture de ce composant, voir figure 12, dans laquelle :

– Entry_A regroupe les interfaces à implanter ;

– Entry_R réalise l'assemblage.

Le modèle B raffiné Entry_R est complété pour exprimer l'implantation des éléments de RI_Entry et de RI_Turn en utilisant ceux de PI_Turn et PI_Entry : ici, il s'agit principalement d'exprimer des renommages, comme l'indique la figure 13. La preuve du raffinement de RI_Entry et de RI_Turn garantit que le modèle donné pour Entry est correct dans le sens où il réalise bien ce qui est attendu.

5.4. *Le composant* Identification

Pour répondre aux besoins exprimés par RI_Ident et PI_Ident concernant le processus d'identification d'une personne, plusieurs composants devront être utilisés :

– CardReader via ses interfaces RI_Reader et PI_Reader et

– deux instances, green et red, du composant Light via son interface PI_Light.

Des diagrammes de séquences peuvent être utilisés pour expliciter le protocole d'utilisation du composant de Identification : à chaque méthode de chaque interface requise, on associe la réaction de l'assemblage, c.à.d. les appels aux méthodes nécessaires des interfaces fournies. Par exemple, la méthode accept_id() de RI_Ident correspond à une notification d'autorisation d'accès d'une personne par le système de contrôle d'accès. Son comportement attendu est décrit à l'aide du diagramme de séquences de la figure 14. L'adaptateur doit réagir en termes des interfaces fournies :

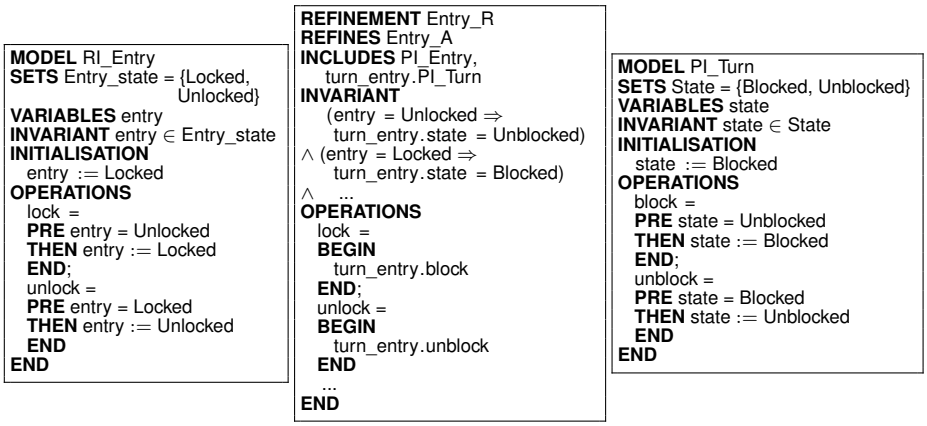


Figure 13 – Modèles B de RI_Entry, Entry_R et PI_Turn

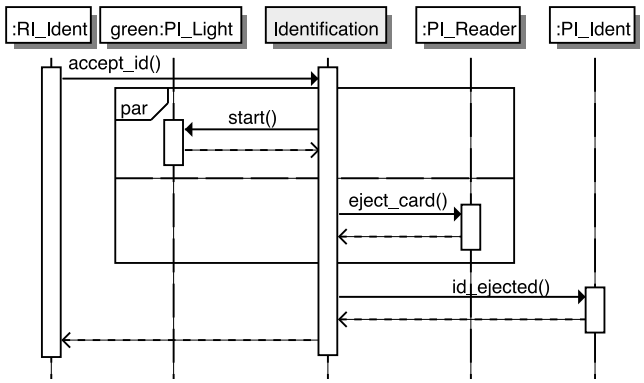


Figure 14 – Diagramme de séquences pour accept_id()

– en allumant la lampe verte (Green.start()) pour avertir l'usager de son autorisation d'accès tout en éjectant la carte (eject_card()), puis

– en notifiant au contrôleur d'accès l'éjection de la carte (id_ejected()).

Le composant Identification est obtenu par application du schéma d'assemblage de plusieurs composants, comme illustré figure 15. Le modèle B abstrait Identification_A regroupe les interfaces à implanter. Le modèle B de l'assemblage, Identification_R, raffine Identification_A afin d'assurer que l'assemblage est correct. Le code B présenté figure 16 complète le squelette du schéma :

– l'invariant établit un lien entre les variables à fournir reader_state et signal et les variables fournies par les interfaces PI_Ident, PI_Reader, green.PI_Light et red.PI_Light ;

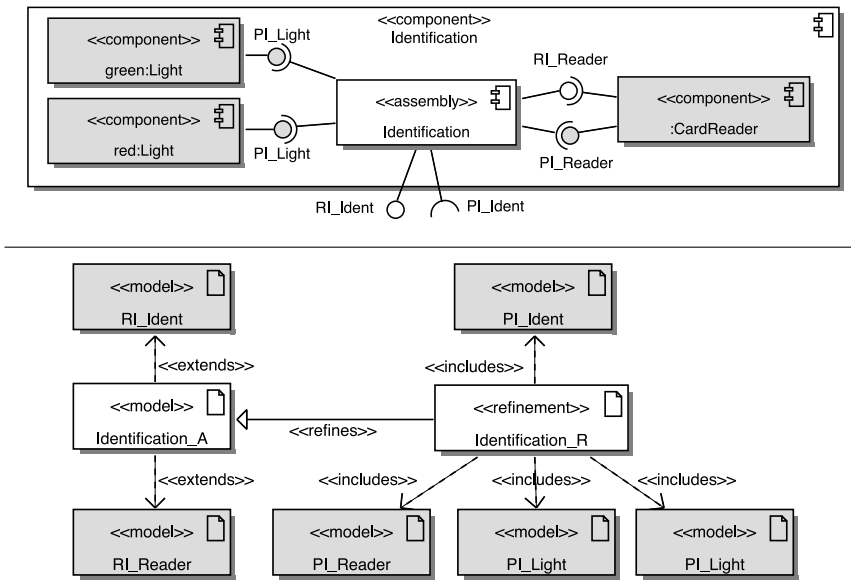


Figure 15 – Composant Identification

– chaque méthode de RI_Reader et de RI_Ident est exprimée en termes d'appels aux méthodes correspondantes des modèles inclus. La méthode accept_id() correspond à une réécriture en B du diagramme de séquences donné figure 14. La méthode card_taken() correspond également à la réécriture du diagramme de séquences correspondant, donné figure 17.

```
REFINEMENT Identification_R
REFINES Identification_A
INCLUDES
  red.PI_Light, green.PI_Light,
  PI_Reader,
  PI_Ident
VARIABLES reader_state
INVARIANT
  (green.state = On ⇒
    red.state = Off) ∧
  (red.state = On ⇒
    green.state = Off) ∧
  (signal = No_signal ⇒
      (green.state = Off ∧
       red.state = Off))
OPERATIONS
  accept_id =
  BEGIN
    BEGIN
      green.start || eject_card
    END ;
    id_ejected
  END;
  card_taken =
  BEGIN
    id_taken ;
    SELECT red.state = On
      THEN red.stop
    WHEN green.state = On
      THEN green.stop
    END;
    reader_state := RWaiting
  END;
  ...
END
```

Figure 16 – Extraits de Identification_R

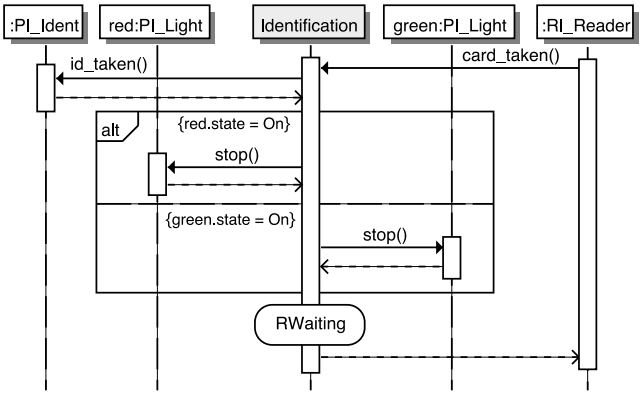


Figure 17 – Diagramme de séquences pour card_taken()

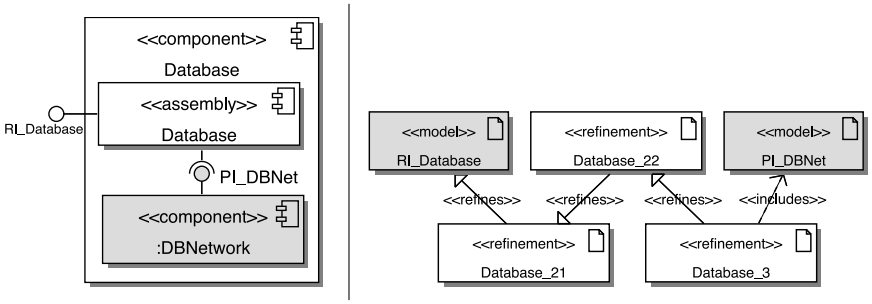


Figure 18 – Composant Database

5.5. *Le composant* Database

Les interfaces RI_Database et PI_DBNet présentent des modèles de données différents :

– RI_Database permet de vérifier si un couple (porte,personne) est autorisé ou non ;

– PI_DBNet permet de mémoriser dans une base de données des couples (Uid, Value) d'entiers naturels.

L'adaptation est effectuée en appliquant le schéma de base lorsqu'une seule interface est en jeu dans l'assemblage avec la mise en correspondance des modèles de données. Les schémas de l'architecture UML et B du composant Database sont présentés figure 18. Plusieurs étapes de raffinement sont nécessaires pour développer le modèle B associé :

1) L'étape d'**adaptation des variables** n'est pas nécessaire puisque celles-ci peuvent être facilement mises en correspondance (voir figure 19) : les utilisateurs sont

mis en correspondance avec le champ Uid de la base de données, et les portes avec le champ Value.

2) L'**adaptation des types de données** est décomposée en deux étapes afin de faciliter la preuve :

- dans Database_21, une fonction de transtypage user_cast est introduite afin de transformer le domaine de la relation permissions en le domaine les entiers naturels ; une nouvelle variable n_permissions est également introduite ;

- il s'agit maintenant de transformer le codomaine de n_permissions en le domaine des entiers naturels. Une fonction de transtypage door_cast, ainsi qu'une nouvelle variable nn_permissions, sont introduites dans Database_22.

3) La **dernière étape** consiste à associer les attributs Uid et Value de PI_DBNet à nn_permissions, c'est-à-dire à préciser les relations entre les structures de données, dans Database_3. C'est également lors de cette étape que le corps des méthodes se réduit à l'appel des méthodes correspondantes du composant fourni (ici, has_permission appelle select_from_uid).

Les fonctions user_cast et door_cast correspondent à une connaissance implicite qu'il existe effectivement un moyen de faire correspondre à un utilisateur ou une porte un entier naturel qui le/la symbolise. Cette connaissance peut être justifiée de deux manières : soit ces fonctions peuvent être fournies par l'utilisateur de la base de données, soit elles sont une propriété des types de données des utilisateurs et des portes. Par exemple, si un utilisateur est représenté par une chaîne de caractères, l'entier associé peut être celui représenté par la chaîne d'octets constituant la chaîne.

Enfin, le fait que user_cast et door_cast soient des constantes n'est pas gênant dans la mesure où le dernier raffinement n'est pas transformé en implantation. À ce moment-là il faudrait effectivement expliciter leurs valeurs, comme décrit dans la section 2.1.3. C'est une des raisons qui motivent notre choix délibéré de ne pas utiliser l'implantation, tel que nous l'avons justifié de manière plus abstraite en section 3.4.

Notons que les états des interfaces mises en œuvre restent disjoints. En effet, il n'est pas possible de lier ces états, que ce soit au niveau des préconditions des méthodes ou des modifications effectuées, en utilisant les nouveaux états introduits dans le raffinement. Ce phénomène est induit par l'utilisation de composants indépendants. L'assemblage doit créer des liens qui n'existent pas : ceux-ci imposent un style de programmation défensif, traduit par l'utilisation dans notre exemple de gardes (clause SELECT) plutôt que de préconditions (style offensif).

Les différents assemblages présentés ainsi que les interfaces nécessaires ont tous été validés avec B4free. Cela nous permet d'assurer que les nouveaux composants développés par assemblage de composants existants sont corrects. Le détail des obligations de preuves (OPs) est donné dans le tableau 1. Pour cet exemple, les difficultés de preuve sont liées à des obligations de preuve dont les buts sont constitués de nombreuses clauses disjonctives. Dans certains cas, elles proviennent aussi de la difficulté qu'a le prouveur de faire le lien entre les domaines et les codomaines des différentes constantes et les variables fonctionnelles du modèle.

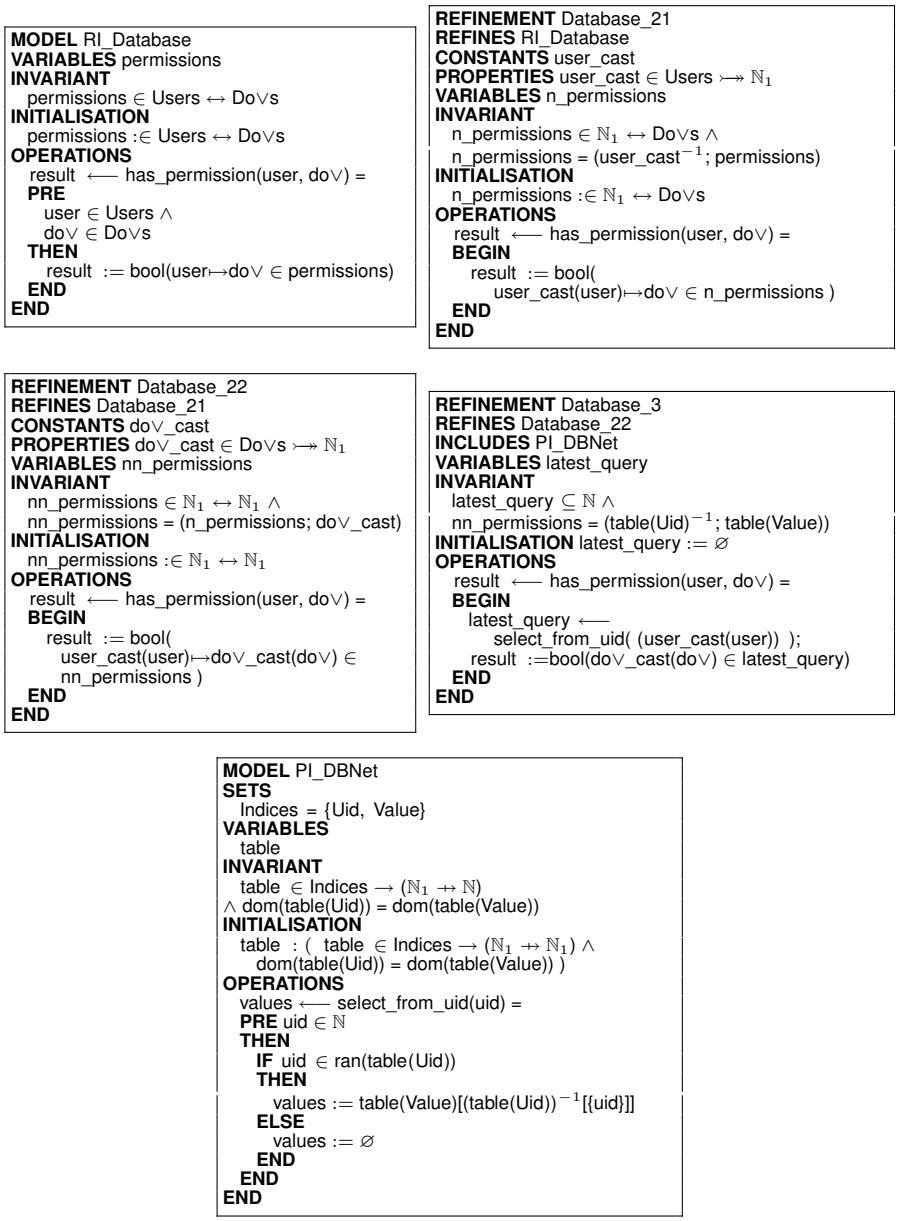


Figure 19 – Mise en correspondance des modèles de données

Modèles B\OPs	évidentes	automatiques	interactives
Types	1	0	0
PI_Turn	5	0	0
RI_Turn	3	0	0
PI_Entry	3	0	0
RI_Entry	5	0	0
PI_Exit	3	0	0
Entry	**12**	**2**	**0**
Exit	**3**	**0**	**0**
PI_Light	5	0	0
PI_Reader	7	0	0
RI_Reader	9	0	0
PI_Ident	11	0	0
RI_Ident	7	0	0
Identification_A	**9**	**0**	**0**
Identification_R	**62**	**6**	**2**
PI_DBNet	12	10	4
RI_Database	3	0	0
Database_21	**6**	**2**	**2**
Database_22	**6**	**2**	**2**
Database_3	**5**	**8**	**2**
TOTAL	**177**	**30**	**12**

Tableau 1 – Obligations de preuves

6. État de l'art

Les travaux de recherche relatifs à l'adaptation de composants sont nombreux et la nécessité de disposer de mécanismes d'assemblage performants pour les réaliser a été reconnue dès les années 1990 (Brown *et al.*, 1996; Heineman *et al.*, 1999). Nous pouvons tout d'abord différencier les approches statiques, qui correspondent à un point du vue plus architectural, et les approches dynamiques, qui se placent d'un point de vue local ou à l'exécution.

Les approches statiques se placent plutôt du point de vue de la construction et fournissent des outils pour ce faire. Une des premières approches est par exemple celle de Purtilo et Atlee (Purtilo *et al.*, 1991) : ils proposent un langage dédié, Nimble, qui permet aux programmeurs d'établir des correspondances entre appels d'opérations dans une application client/serveur. L'approche est basée sur des transformations de réordonnancement de paramètres, de conversion de types et de spécification de valeurs par défaut pour les paramètres manquants. D'autres approches similaires proposent l'utilisation d'autres langages pour atteindre le même but. Par exemple le langage Wright (Allen, 1997) utilise l'algèbre de processus CSP pour l'expression des protocoles des composants et de connecteurs. Darwin (Magee *et al.*, 1994) utilise l'algèbre de processus FSP de manière similaire. Ehrig & al (Ehrig *et al.*, 2004) font de même en utilisant les réseaux de Petri et CSP : les connexions sont représentées par des transformations de graphe comprenant les notions de composition, d'extension et de raffinement. Notre approche s'inscrit dans la lignée de ces travaux, avec l'avantage d'utiliser des standards connus, outillés et/ou assez facilement outillables.

Toujours dans le registre statique, Bracciali & al (Bracciali *et al.*, 2005) utilisent le π-calcul pour formaliser les adaptateurs, vus comme des ensembles de propriétés qui font correspondre les méthodes et les paramètres des composants requis et fournis. Reussner et Schmidt considèrent une certaine classe de problèmes dans le contexte des systèmes concurrents (Reussner *et al.*, 2003). L'incompatibilité des protocoles est résolue par la génération d'adaptateurs en utilisant les interfaces décrites en termes de

machines à états finis. Par opposition à ces approches, la méthode B permet d'aborder le problème de l'interopérabilité des composants au niveau des protocoles mais aussi de la signature et de la sémantique.

D'autres approches proposent d'adopter un point de vue plus mathématique sur la définition de l'adaptation de composants. Il suffit ensuite de chercher quelles approches pragmatiques correspondent aux propriétés mathématiques des systèmes obtenus pour outiller l'assemblage. Zaremski et Wing (Zaremski *et al.*, 1997) spécifient algébriquement le comportement des composants logiciels pour pouvoir décider de leur compatibilité. Leur approche est outillée via Larch qui permet de vérifier la correspondance entre composants. Yellin & Strom (Yellin *et al.*, 1997) ont une approche similaire : ils se basent sur des machines à états finis pour spécifier le comportement des composants et définir formellement l'interopérabilité et l'adaptation. L'outillabilité est justifiée par l'existence de nombreuses techniques pour les machines à états finis.

Nous pouvons également mentionner une approche mathématique dont nous nous rapprochons de manière incidente. Back (Back, 2005) propose des diagrammes architectoniques basés sur des notions mathématiques tels les treillis, le raffinement et les transformateurs de prédicats. Il aboutit par ce biais à une représentation fidèle et complète des différentes notions d'évolution logicielle existantes. L'utilisation de concepts similaires dans les travaux de Back et notre approche (diagrammatique UML, raffinement, transformateurs de prédicats) peut faire percevoir notre approche d'adaptation comme une illustration des travaux de Back. En particulier, Back amalgame la construction d'un raffinement et sa validation. Il est pertinent de voir nos travaux comme une explicitation des problématiques posées par celles-ci pour l'évolution d'un logiciel, au moins du point de vue de l'adaptation de composants.

Les approches dynamiques, moins fréquentes, ont l'avantage d'une plus grande automatisation. Par exemple, les travaux de Poizat & al. (Poizat *et al.*, 2007) procèdent d'une vue plus locale de l'adaptation : les interfaces sont vues au travers de systèmes de transition, exprimables dans un dialecte d'une algèbre de processus. La mise en relation de composants met en avant leurs incompatibilités, et à partir de ces incompatibilités un adaptateur est généré automatiquement. Cette approche très automatisée concerne encore la construction du système, mais d'autres approches proposent de le faire à l'exécution. Cette adaptation dynamique se base souvent sur la recherche du composant adapté plutôt que sur la construction de l'adaptateur (Mätzel *et al.*, 1997; Kniesel, 1999). Cette recherche de composant adapté se justifie par une notion de composition basée sur l'héritage : de cette manière rechercher le composant adapté revient à recherche un composant fourni dont il est possible d'hériter. Ces approches dynamiques sont cependant fortement basées sur la notion de sous-typage dans un contexte de programmation objet, et donc sont moins flexibles en termes d'expressivité que notre approche.

De plus la génération automatique d'adaptateurs est limitée à une certaine classe de problèmes car la vérification de l'interopérabilité repose sur la décidabilité de l'inclusion des composants. Dans notre approche, nous proposons des schémas pour construire et vérifier les adaptateurs, en fonction de différents cas de figures de l'architecture, sans aller jusqu'à leur génération automatique.

7. Conclusion

L'approche composants est un paradigme bien connu et utilisé dans le développement de logiciels, aussi bien dans le milieu académique que dans le milieu industriel. Dans cette approche, les composants sont considérés comme des boîtes noires décrites seulement par leur comportement visible et leurs interfaces, qu'elles soient requises ou fournies. Ils sont assemblés via leurs interfaces. La correction d'une connexion pouvant s'exprimer en termes de raffinement, l'interface fournie doit raffiner l'interface requise.

Dans une approche de réutilisation de composants existants, les composants ont rarement des interfaces fournies qui raffinent directement l'interface requise du composant auquel on veut le connecter. Il est nécessaire d'introduire un adaptateur entre les composants pour les rendre compatibles. Un adaptateur est un programme qui définit comment les interfaces requises sont réalisées en termes des interfaces fournies : il exprime la correspondance entre variables, types et opérations.

Nous avons proposé une approche pour le développement formel par composants basée sur des schémas d'assemblages UML et B. Cette approche est systématique dans le sens où elle propose un schéma d'assemblage pour chaque cas de l'architecture de composants considérée, depuis un assemblage simple de deux composants ayant une seule interface, jusqu'à l'assemblage de plusieurs composants ayant chacun les deux types d'interfaces en incluant la mise en correspondance des modèles de données lorsque cela est nécessaire. Ces schémas permettent d'exprimer la notion d'adaptateur et plus généralement le développement d'un nouveau composant par assemblage de composants existants, en fonction des différents cas de figures de l'architecture. Nous ne proposons pas de les générer automatiquement.

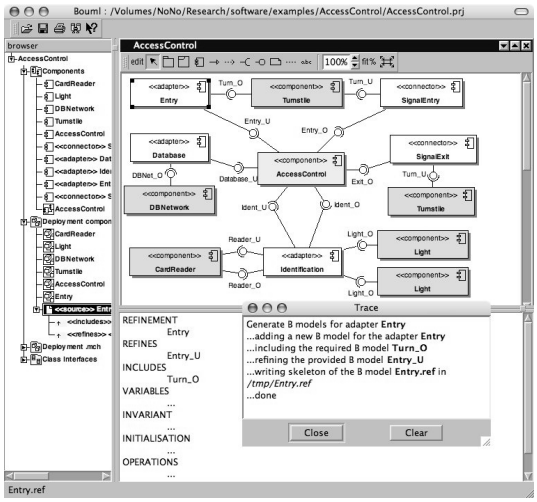


Figure 20 – BOUML pour générer un modèle B

Grâce à l'utilisation de la méthode B, et de ses mécanismes d'assemblage et de raffinement pour modéliser les interfaces et les adaptateurs, nous obtenons la preuve de la correction de l'assemblage de composants. Le prouveur B garantit que cet assemblage est une implantation correcte des fonctionnalités attendues en termes des composants existants.

Les points forts de notre approche sont :

– l'utilisation de notations simples et de haut niveau pour exprimer l'architecture du système et ses interfaces ;

– des schémas d'assemblage utilisant les mécanismes classiques de composition et de raffinement ;

– un guide pour développer incrémentalement de nouveaux composants ;

– la preuve de la correction de l'assemblage des composants.

L'implantation d'un plugin pour BOUML[3] fondé sur les schémas de développement présentés dans cet article est en cours : la figure 20 montre la génération du squelette du modèle B correspondant à l'assemblage Entry.

L'extension de l'approche avec la prise en compte de propriétés de sécurité dans une architecture composants existante, sans modification de ses fonctionnalités de base (Lanoix *et al.*, 2007) est en cours d'étude. Ce travail doit également être complété par un outil d'aide à la détection des incompatibilités.

Remerciements

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre du projet TACOS[4], référence ANR-06-SETI-017.

8. Bibliographie

Abrial J.-R., *The B Book*, Cambridge University Press, 1996.

AFADL'2000, « Étude de cas : système de contrôle d'accès », *Journées AFADL, Approches formelles dans l'assistance au développement de logiciels*, 2000. actes LSR/IMAG.

Allen R. J., A Formal Approach to Software Architecture, PhD thesis, Carnegie Mellon University, May, 1997. Technical Report Number : CMU-CS-97-144.

Back R.-J., *Incremental Software Construction with Refinement Diagrams*, vol. 195 of *NATO Science Series*, Springer Netherlands, chapter 1, p. 3-46, 2005.

Badeau F., Amelot A., « Using B as a High Level Programming Language in an Industrial Project : Roissy VAL », *ZB 2005 : Formal Specification and Development in Z and B, 4th International Conference of B and Z Users*, vol. 3455 of *LNCS*, Springer-Verlag, p. 334-354, 2005.

Behm P., Benoit P., Meynadier J. M., « METEOR : A Successful Application of B in a Large Project », *Integrated Formal Methods, IFM99*, vol. 1708 of *LNCS*, Springer Verlag, p. 369-387, 1999.

3. http ://bouml.free.fr
4. http ://tacos.loria.fr

Boulmé S., Potet M.-L., « Interpreting Invariant Composition in the B Method Using the Spec# Ownership Relation : A Way to Explain and Relax B Restrictions. », *The 7th International B Conference*, p. 4-18, 2007.

Bracciali A., Brogi A., Canal C., « A Formal Approach to Component Adaptation », *Journal of Systems and Software*, vol. 74, n° 1, p. 45-54, 2005.

Brown A. W., Wallnan K. C., « Engineering of component-based systems », *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Engineering of Complex Computer Systems (ICECCS '96)*, IEEE Computer Society, p. 414, 1996.

Chouali S., Heisel M., Souquières J., « Proving Component Interoperability with B Refinement », *Electronic Notes in Theoretical Computer Science (ENTCS)*, vol. 160, p. 157-172, 2006.

Clearsy, « B4free », , website, 2004. `http://www.b4free.com`.

Colin S., Lanoix A., Souquières J., « Trustworthy interface compliancy : data model adaptation », *Formal Foundations of Embedded Software and Component-Based Software Architectures (FESCA), Satellite workshop of ETAPS*, March, 2007. 13 pages. To be published in Electronic Notes in Theoretical Computer Science (ENTCS).

Dijkstra E. W., *A Discipline of Programming*, Prentice Hall, 1976.

Ehrig H., Padberg J., Braatz B., Klein M., Orejas F., Perez S., Pino E., « A Generic Framework for Connector Architectures based on Components and Transformation », *FESCA'04, satellite of ETAPS'04*, vol. 108 of *ENTCS*, p. 53-67, 2004.

Hatebur D., Heisel M., Souquières J., « A Method for Component-Based Software and System Development », *Proceedings of the 32nd Euromicro Conference on Software Engineering And Advanced Applications*, IEEE Computer Society, p. 72-80, 2006.

Heineman G., Ohlenbusch H., An Evaluation of Component Adaptation Techniques, Technical Report n° WPI-CS-TR-98-20, Department of Computer Science, Worcester Polytechnic Institute, February, 1999.

Kniesel G., « Type-Safe Delegation for Run-Time Component Adaptation », *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 1628, p. 351-366, 1999.

Lanoix A., Hatebur D., Heisel M., Souquières J., « Enhancing Dependability of Component-based Systems », *in* S. Verlag (ed.), *Reliable Software Technologies Ada-Europe 2007*, n° 4498 in *LNCS*, Springer Verlag, p. 41-54, 2007.

Ledang H., Souquières J., « Modeling class operations in B : application to UML behavioral diagrams », *ASE'2001 : 16th IEEE International Conference on Automated Software Engineering*, IEEE Computer Society, p. 289-296, 2001.

Magee J., Dulay N., Kramer J., « A Constructive Development Environment for Parallel and Distributed Programs », *proceedings of the 2nd International Workshop on Configurable Distributed Systems*, 1994.

Mätzel K.-U., Schnorf P., Dynamic Component Adaptation, Technical report, Ubilab laboratory, Union Bank of Switzerland, Zürich, Switzerland, June, 1997.

Meyer E., Souquières J., « A systematic approach to transform OMT diagrams to a B specification », *Proceedings of the Formal Method Conference*, n° 1708 in *LNCS*, Springer-Verlag, p. 875-895, 1999.

Mouakher I., Lanoix A., Souquières J., « Component Adaptation : Specification and Verification », *Proc. of the 11th Int. Workshop on Component Oriented Programming (WCOP'06), satellite workshop of ECOOP*, p. 23-30, 2006.

OMG, *UML Superstructure Specification*. 2005, version 2.0.

Poizat P., Salaün G., Tivoli M., « An Adaptation-based Approach to Incrementally Build Component Systems », *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, vol. 182, p. 155-170, 2007.

Purtilo J. M., Atlee J. M., « Module Reuse by Interface Adaptation », *Software - Practice and Experience*, vol. 21, n° 6, p. 539-556, 1991.

Reussner R. H., Schmidt H. W., Poernomo I. H., « Reasoning on Software Architectures with Contractually Specified Components », *in* A. Cechich, M. Piattini, A. Vallecillo (eds), *Component-Based Software Quality : Methods and Techniques*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, p. 287-325, 2003.

RODIN, « Rigorous Open Development Environment for Complex Systems », , `http://rodin-b-sharp.sourceforge.net`, August, 2007.

Steria, *Obligations de preuve : Manuel de référence, version 3.0*, Steria – Technologies de l'information. 1998.

Szyperski C., *Component Software*, ACM Press, Addison-Wesley, 1999.

Yellin D. D. M., Strom R. E., « Protocol Specifications and Component Adaptors. », *ACM Transactions on Programming Languages and Systems*, vol. 19, n° 2, p. 292-333, 1997.

Zaremski A. M., Wing J. M., « Specification matching of software components », *ACM Transaction on Software Engeniering Methodolology*, vol. 6, n° 4, p. 333-369, 1997.