

# Ingénierie des Modèles

## Méta-modélisation

Eric Cariou

Master TIIL-A 2<sup>ème</sup> année

Université de Bretagne Occidentale  
UFR Sciences & Techniques – Département Informatique

Eric.Cariou@univ-brest.fr

1

## Principales normes modélisation OMG

- ◆ MOF : Meta-Object Facilities
  - ◆ Langage de définition de méta-modèles
- ◆ UML : Unified Modelling Language
  - ◆ Langage de modélisation
- ◆ CWM : Common Warehouse Metamodel
  - ◆ Modélisation ressources, données, gestion d'une entreprise
- ◆ OCL : Object Constraint Language
  - ◆ Langage de contraintes sur modèles
- ◆ XMI : XML Metadata Interchange
  - ◆ Standard pour échanges de modèles et méta-modèles entre outils

3

## Hierarchie de modélisation à 4 niveaux

- ◆ L'OMG définit 4 niveaux de modélisation
  - ◆ M0 : système réel, système modélisé
  - ◆ M1 : modèle du système réel défini dans un certain langage
  - ◆ M2 : méta-modèle définissant ce langage
  - ◆ M3 : méta-méta-modèle définissant le méta-modèle
    - ◆ Le niveau M3 est le MOF
    - ◆ Dernier niveau, il est méta-circulaire : il peut se définir lui même
- ◆ Le MOF est – pour l'OMG – le méta-méta-modèle unique servant de base à la définition de tous les méta-modèles

5

## Introduction/Plan

- ◆ But de la méta-modélisation
  - ◆ Définir des langages de modélisation ou des langages de manière générale
- ◆ Architecture MOF de l'OMG
  - ◆ 4 niveaux de (méta)modélisation
- ◆ Syntaxes abstraite et concrète
- ◆ Définition de méta-modèles
  - ◆ Profils UML
  - ◆ MOF
  - ◆ Ecore

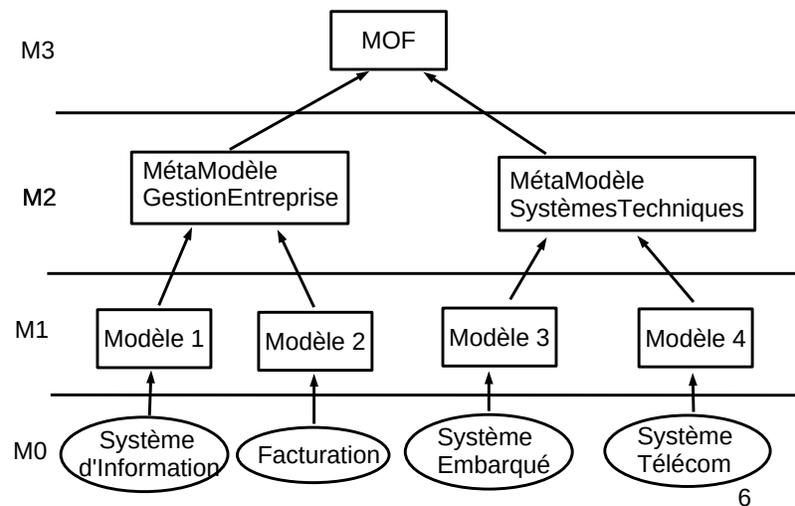
2

## Normes OMG de modélisation

- ◆ Plusieurs de ces normes concernent la définition et l'utilisation de méta-modèles
  - ◆ MOF : but de la norme
  - ◆ UML et CWM : peuvent être utilisés pour en définir
  - ◆ XMI : pour échange de (méta-)modèles entre outils
- ◆ MOF
  - ◆ C'est un méta-méta-modèle
    - ◆ Utilisé pour définir des méta-modèles
  - ◆ Définit les concepts de base d'un méta-modèle
    - ◆ Entité/classe, relation/association, type de données, référence, package ...
  - ◆ Le MOF peut définir le MOF

4

## Hierarchie de modélisation à 4 niveaux



6

## Hierarchie de modélisation à 4 niveaux

- ◆ Hiérarchie à 4 niveaux existe en dehors du MOF et d'UML, dans d'autres espaces technologiques que celui de l'OMG
- ◆ Langage de programmation
  - ◆ M0 : l'exécution d'un programme
  - ◆ M1 : le programme
  - ◆ M2 : la grammaire du langage dans lequel est écrit le programme
  - ◆ M3 : le concept de grammaire EBNF
- ◆ XML
  - ◆ M0 : données du système
  - ◆ M1 : données modélisées en XML
  - ◆ M2 : DTD / Schema XML
  - ◆ M3 : le langage XML

7

## Méta-modélisation UML

- ◆ Pour modéliser ce système, il faut définir 2 diagrammes UML : niveau M1
  - ◆ Un diagramme de classe pour représenter les relations entre les éléments (portes, murs, pièce)
  - ◆ Un diagramme d'état pour spécifier le comportement d'une porte ou d'une fenêtre (ouverte, fermée)
  - ◆ On peut abstraire le comportement des portes et des fenêtres en spécifiant les opérations d'ouverture/fermeture dans une interface
    - ◆ Le diagramme d'état est associé à cette interface
  - ◆ Il faut également ajouter des contraintes OCL pour préciser les contraintes entre les éléments d'une pièce

9

## M1 : spécification du système

- ◆ Invariants OCL pour compléter la spécification
  - ◆ **context** Mur **inv**:  
`not self.fenetre.oclIsUndefined() implies self.porte.oclIsUndefined()`  
**and**  
`not self.porte.oclIsUndefined() implies self.fenetre.oclIsUndefined()`  
*Si un mur a une fenêtre, il ne peut pas avoir de porte et inversement*
  - ◆ **context** Piece **inv**:  
`self.mur.fenetre -> size() = 2 and self.mur.porte -> size() = 1`  
*Au total, sur les murs de la pièce, il y a 2 fenêtres et 1 mur*
  - ◆ **context** Porte **inv**: `self.piece = self.mur.piece`  
**context** Fenetre **inv**: `self.piece = self.mur.piece`  
*Une porte ou une fenêtre est associée à un mur de sa propre pièce*

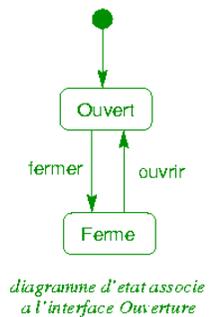
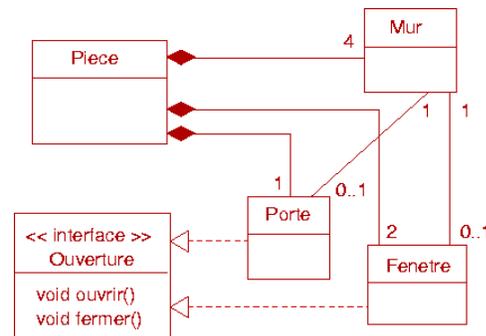
11

## Méta-modélisation UML

- ◆ Avec UML, on retrouve également les 4 niveaux
  - ◆ Mais avec le niveau M3 définissable en UML directement à la place du MOF
- ◆ Exemple de système réel à modéliser (niveau M0)
  - ◆ Une pièce possède 4 murs, 2 fenêtres et une porte
  - ◆ Un mur possède une porte ou une fenêtre mais pas les 2 à la fois
  - ◆ Deux actions sont associées à une porte ou une fenêtre : ouvrir et fermer
  - ◆ Si on ouvre une porte ou une fenêtre fermée, elle devient ouverte
  - ◆ Si on ferme une porte ou une fenêtre ouverte, elle devient fermée

8

## M1 : spécification du système



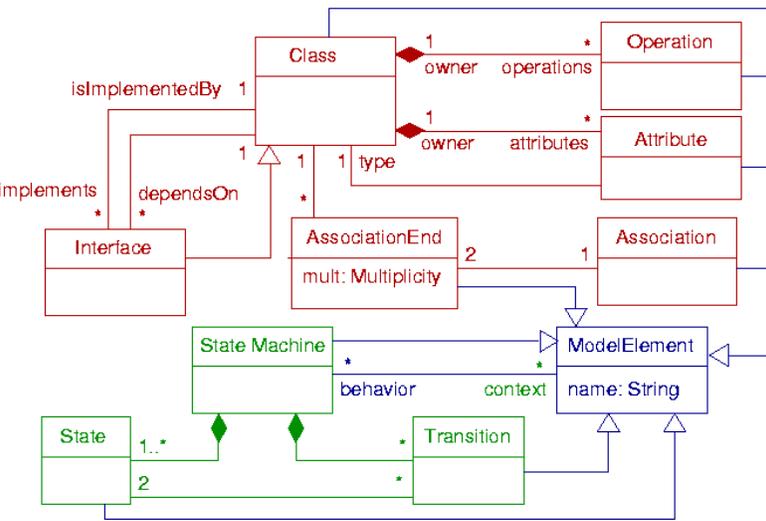
10

## Méta-modélisation UML

- ◆ Les 2 diagrammes UML de ce modèle de niveau M1 sont conformes par principe au méta-modèle UML (niveau M2)
- ◆ Un méta-modèle définit un langage (UML ici)
  - ◆ Définition des concepts du langage
  - ◆ Définition des relations entre les concepts du langage
- ◆ On peut utiliser ici un diagramme de classes UML
  - ◆ Classes = concepts et relations = associations
  - ◆ Avec invariants OCL pour compléter la spécification
- ◆ Pour notre exemple
  - ◆ Doit définir les concepts et leurs relations pour les diagrammes de classes et les machines à états
  - ◆ (devrait aussi définir le méta-modèle d'OCL ...)

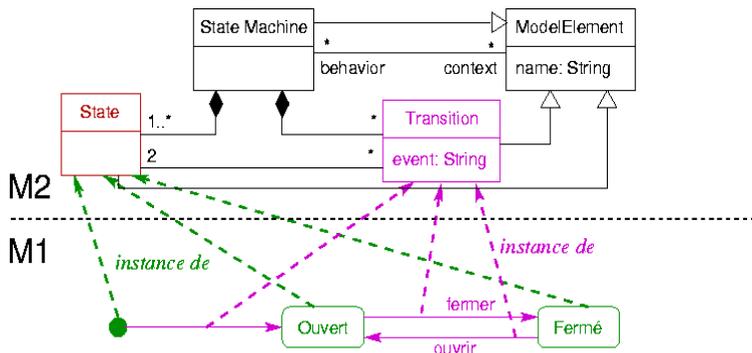
12

## M2 : Méta-modèle UML (très simplifié)



## Liens éléments modèle/méta-modèle

- ◆ Chaque élément du modèle
- ◆ Est une « instance » d'un élément du méta-modèle (d'un méta-élément)
- ◆ En respectant les contraintes définies dans le méta-modèle
- ◆ Exemple avec diagramme de machines à états



## Extrait méta-modèle UML 2.0

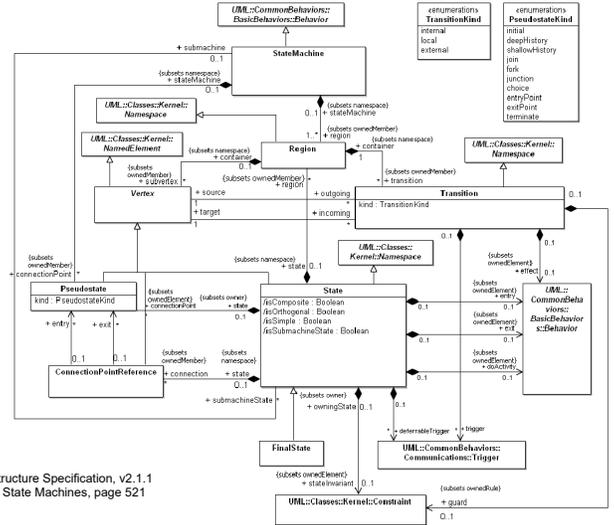
- ◆ Exemples de contraintes OCL pour la spécification des machines à états
- ◆ Invariants de la classe **StateMachine**
  - ◆ The classifier context of a state machine cannot be an interface.
    - ◆ `context->notEmpty() implies not context.ocIsKindOf(Interface)`
  - ◆ The context classifier of the method state machine of a behavioral feature must be the classifier that owns the behavioral feature.
    - ◆ `specification->notEmpty() implies (context->notEmpty() and specification->featuringClassifier->exists (c | c = context))`
  - ◆ The connection points of a state machine are pseudostates of kind entry point or exit point.
    - ◆ `connectionPoint->forall (c | c.kind = #entryPoint or c.kind = #exitPoint)`

## M2 : Méta-modèle UML (très simplifié)

- ◆ Contraintes OCL, quelques exemples
- ◆ **context** Interface **inv**: `self.attributes -> isEmpty()`  
*Une interface est une classe sans attribut*
- ◆ **context** Class **inv**: `self.attributes -> forall ( a1, a2 | a1 <> a2 implies a1.name <> a2.name)`  
*2 attributs d'une même classe n'ont pas le même nom*
- ◆ **context** StateMachine **inv**: `self.transition -> forall ( t | self.state -> includesAll(t.state))`  
*Une transition d'un diagramme d'état connecte 2 états de ce même diagramme d'état*

## Extrait méta-modèle UML 2.0

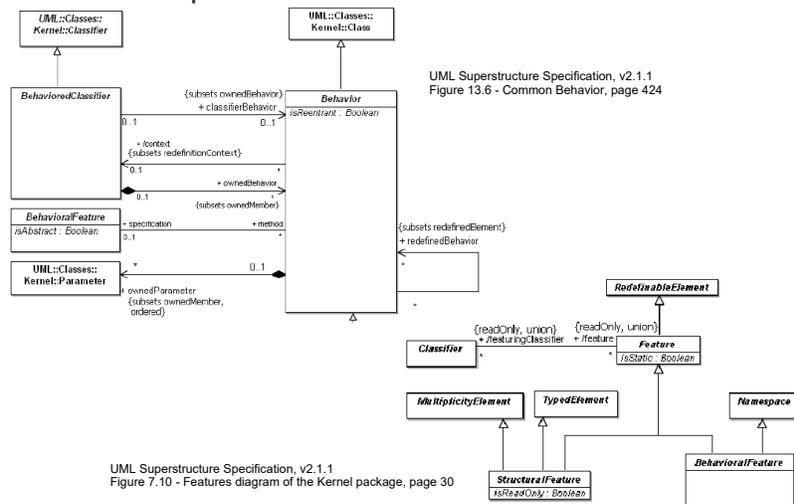
- ◆ Partie spécifiant les machines à états



UML Superstructure Specification, v2.1.1  
Figure 15.2 - State Machines, page 521

## Extrait méta-modèle UML 2.0

- ◆ Pour comprendre les contraintes OCL



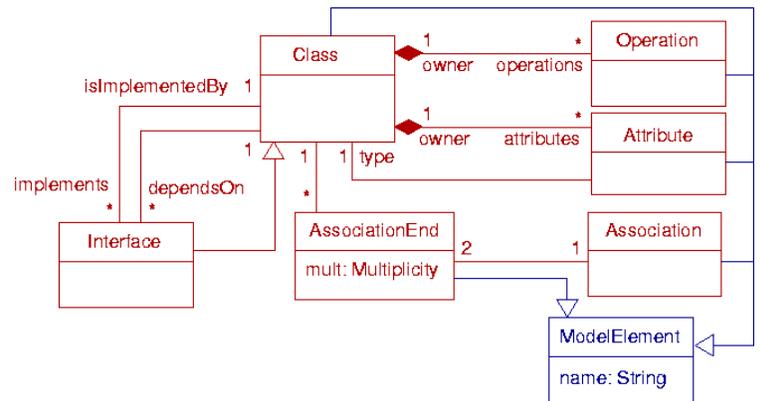
UML Superstructure Specification, v2.1.1  
Figure 7.10 - Features diagram of the Kernel package, page 30

## Méta-modélisation UML

- Le méta-modèle UML doit aussi être précisément défini
  - Il doit être conforme à un méta-modèle
  - C'est le méta-méta-modèle UML
    - Niveau M3
- Qu'est ce que le méta-modèle UML ?
  - Un diagramme de classes UML (avec contraintes OCL)
- Comment spécifier les contraintes d'un diagramme de classes UML ?
  - Via le méta-modèle UML
  - Ou plus précisément : via la partie du méta-modèle UML spécifiant les diagrammes de classes
- Ici, méta-méta-modèle UML = copie partielle du méta-modèle UML

19

## M3 : Méta-méta-modèle UML (simplifié)



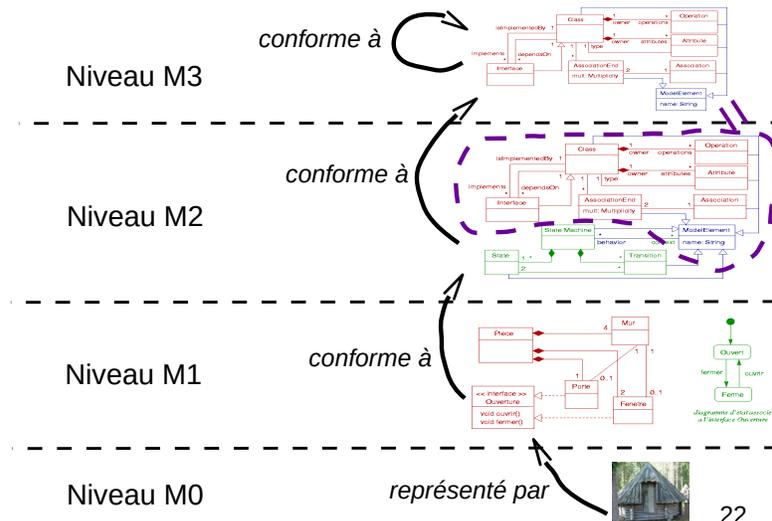
20

## Méta-modélisation UML

- Méta-méta-modèle UML doit aussi être clairement défini
  - Il doit être conforme à un méta-modèle
- Qu'est ce que le méta-méta-modèle UML ?
  - Un diagramme de classe UML
- Comment spécifier les contraintes d'un diagramme de classe ?
  - Via la partie du méta-modèle UML spécifiant les diagrammes de classe
    - Cette partie est en fait le méta-méta-modèle UML
- Le méta-méta-modèle UML peut donc se définir lui même
  - Méta-circularité
  - Pas besoin de niveau méta supplémentaire

21

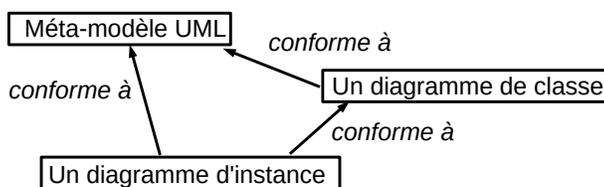
## Hierarchie de modélisation



22

## Diagrammes d'instances UML

- Un diagramme d'instances est particulier car
  - Doit être conforme au méta-modèle UML
    - Qui définit la structure générale des diagrammes d'instances : conformité structurelle
  - Doit aussi être conforme à un diagramme de classe
    - Ce diagramme de classe est un méta-modèle pour le diagramme d'instance : conformité ontologique (de contenu)
    - Diagramme de classes est structurellement conforme également au méta-modèle UML



23

## Hierarchie de modélisation

- Architecture à 4 niveaux
  - Conceptuellement pertinente
- En pratique
  - Certains niveaux sont difficiles à placer les uns par rapport aux autres
  - Cas du diagramme d'instance
    - Diagramme d'instance de l'application : niveau M1
    - Méta-modèle UML : niveau M2
    - Diagramme de classe de l'application : niveau M1 ou M2 ?
      - M1 normalement car modélise l'application et conforme au méta-modèle de niveau M2
      - Mais devrait être M2 rapport au diagramme d'instance qui est de niveau M1
- Conclusion
  - Pas toujours facile ni forcément pertinent de chercher à placer absolument les modèles à tel ou tel niveau
  - L'important est de savoir quel rôle (modèle / méta-modèle) joue un modèle dans une relation de conformité

24

## Syntaxe

- ◆ Un langage est défini par un méta-modèle
- ◆ Un langage possède une syntaxe
  - ◆ Définit comment représenter chaque type d'élément d'un modèle
    - ◆ Élément d'un modèle = instance d'un méta-élément
- ◆ Syntaxe textuelle
  - ◆ Ensemble de mots-clé et de mots respectant des contraintes définies selon des règles précises
    - ◆ Notions de syntaxe et de grammaire dans les langages
    - ◆ Exemple pour langage Java :
 

```
public class MaClasse implements MonInterface { ... }
```
    - ◆ Grammaire Java pour la déclaration d'une classe :
 

```
class_declaration ::= { modifier } "class" identifier
                    [ "extends" class_name ] [ "implements" interface_name
                    { "," interface_name } ] "{" { field_declaration } "}"
```

25

## Syntaxe

- ◆ Syntaxe abstraite/concrète
  - ◆ Abstraite
    - ◆ Les éléments et leurs relations sans une notation spécialisée
    - ◆ Correspond à ce qui est défini au niveau du méta-modèle, à des instances de méta-éléments
  - ◆ Concrète
    - ◆ Syntaxe graphique ou textuelle définie pour un type de modèle
    - ◆ Plusieurs syntaxes concrètes possibles pour une même syntaxe abstraite
- ◆ Un modèle peut être défini via n'importe quelle syntaxe
  - ◆ L'abstraite
  - ◆ Une des concrètes
- ◆ MOF : langage pour définir des méta-modèles
  - ◆ Pas de syntaxe concrète définie

27

## Syntaxe : exemple diagramme état

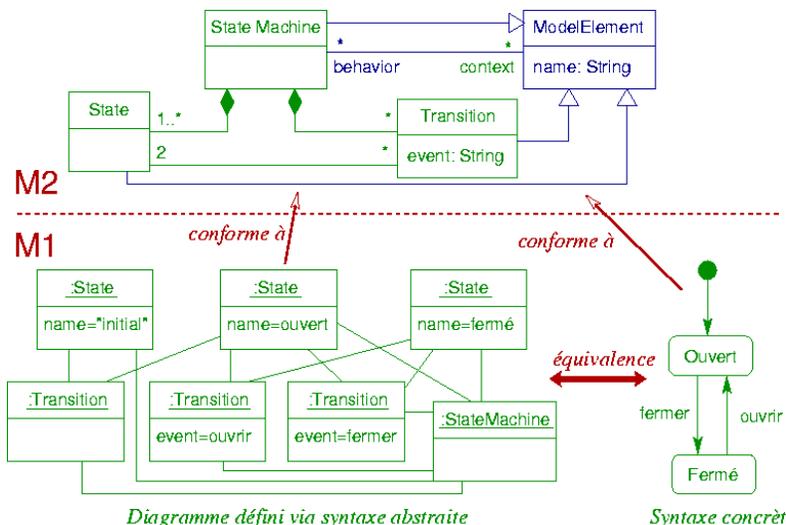


Diagramme défini via syntaxe abstraite

Syntaxe concrète

## Syntaxe

- ◆ Syntaxe graphique
  - ◆ Notation graphique, chaque type d'élément a une forme graphique particulière
  - ◆ Exemple : relations entre classes/interfaces dans les diagrammes de classe UML
    - ◆ Trait normal : association
    - ◆ Flèche, trait pointillé : dépendance
    - ◆ Flèche en forme de triangle, trait en pointillé : implémentation
    - ◆ Flèche en forme de triangle, trait plein : spécialisation

26

## Syntaxe

- ◆ Exemple de la modélisation de la pièce
  - ◆ Syntaxe concrète
    - ◆ 2 diagrammes UML (classes et états) avec syntaxes graphiques spécifiques à ces types de diagrammes
  - ◆ Via la syntaxe abstraite
    - ◆ Diagramme d'instance (conforme au méta-modèle) précisant les instances particulières de classes, d'associations, d'états...
  - ◆ Pour la partie diagramme d'états
    - ◆ Diagramme défini via syntaxe concrète : diagramme d'états de l'exemple
    - ◆ Diagramme défini via syntaxe abstraite : diagramme d'instances conforme au méta-modèle UML

28

## Définition de méta-modèles

- ◆ But : définir un type de modèle avec tous ses types d'éléments et leurs contraintes de relation
- ◆ Plusieurs approches possibles
  - ◆ Définir un méta-modèle nouveau à partir de « rien », sans base de départ
    - ◆ On utilisera alors sur un méta-méta-modèle existant comme MOF ou Ecore
  - ◆ Modifier un méta-modèle existant : ajout, suppression, modification d'éléments et des contraintes sur leurs relations
  - ◆ Spécialiser un méta-modèle existant en rajoutant des éléments et des contraintes (sans en enlever)
    - ◆ Correspond aux profils UML

30

## Profils UML

- ◆ Un profil est une spécialisation du méta-modèle UML
  - ◆ Ajouts de nouveaux types d'éléments
    - ◆ Et des contraintes sur leurs relations entre eux et avec les éléments d'UML
  - ◆ Ajouts de contraintes sur éléments existants d'UML
  - ◆ Ajouts de contraintes sur relations existantes entre les éléments d'UML
  - ◆ Aucune suppression de contraintes ou d'éléments
- ◆ Profil : mécanisme d'extension d'UML pour l'adapter à un contexte métier ou technique particulier
  - ◆ Profil pour composants EJB
  - ◆ Profil pour gestion bancaire
  - ◆ Profil pour architecture logicielle
  - ◆ ...

31

## Profils UML

- ◆ Un profil UML est composé de 3 types d'éléments
  - ◆ Des stéréotypes
  - ◆ Des tagged values
  - ◆ Des contraintes (exprimables en OCL)
    - ◆ Sur ces stéréotypes, tagged values
    - ◆ Sur des éléments du méta-modèle existant
    - ◆ Sur les relations entre les éléments
- ◆ Un profil UML est défini sous la forme d'un package stéréotypé << profile >>
- ◆ Exemple de profil : architecture logicielle
  - ◆ Des composants client et serveur
  - ◆ Un client est associé à un serveur via une interface de service par l'intermédiaire d'un proxy

33

## Exemple profil UML

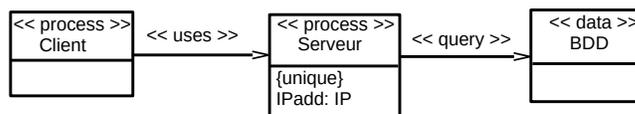
- ◆ Pour compléter le profil, ajout de contraintes OCL
  - ◆ Navigation sur le méta-modèle UML (simplifié) en considérant que la méta-classe Class a trois spécialisations (Server, Client, Proxy)
  - ◆ Un proxy associé à un client doit implémenter une des interfaces dont dépend le client et un proxy implémentant une interface d'un client doit avoir une association avec ce client
  - ◆ **context** Client inv:
 

```
let proxies = self.associationEnd.association.associationEnd.-class -> select ( c | c.oclIsTypeOf(Proxy)) in
let interfaces = self.dependsOn in
interfaces -> forAll ( i | proxies.implements -> includes (i) and
proxies -> forAll ( p | p.implements -> includes (i)
implies p.hasClassRefWith(self)))
```
  - ◆ **context** Class def: `hasClassRefWith(cl : Class) : Boolean = self.associationEnd.association.associationEnd.class -> exists ( c | c = cl )`

35

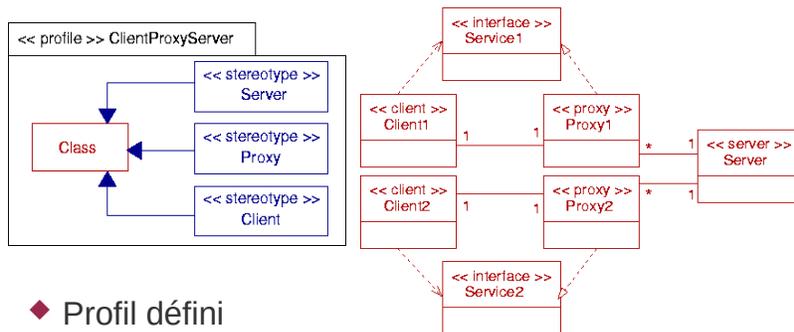
## Profils UML : éléments de spécialisation

- ◆ Stéréotype
  - ◆ Extension, spécialisation d'un élément du méta-modèle
    - ◆ Classe, association, attribut, opération ...
    - ◆ Le nom d'un stéréotype est indiqué entre << ... >>
    - ◆ Il existe déjà des stéréotypes définis dans UML
      - ◆ << interface >> : une interface est un classifieur particulier (sans attribut)
  - ◆ Tagged value (valeur marquée)
    - ◆ Pour marquer des attributs d'une classe pour préciser une contrainte ou un rôle particulier
      - ◆ Exemple : {unique} id: int



32

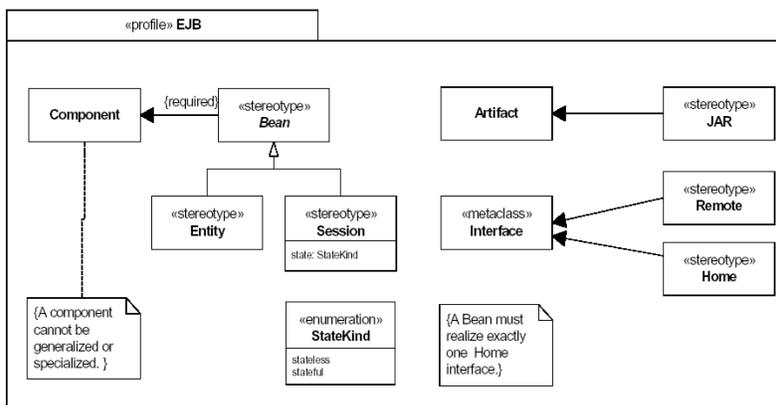
## Exemple profil UML



- ◆ Profil défini
  - ◆ nommé ClientProxyServer
  - ◆ Définit trois stéréotypes
    - ◆ Trois classes jouant un rôle particulier : extensions de la méta-classe Class du méta-modèle UML
      - ◆ Server, Proxy, Client

34

## Autre exemple : profil EJB



Source : norme UML 2.0

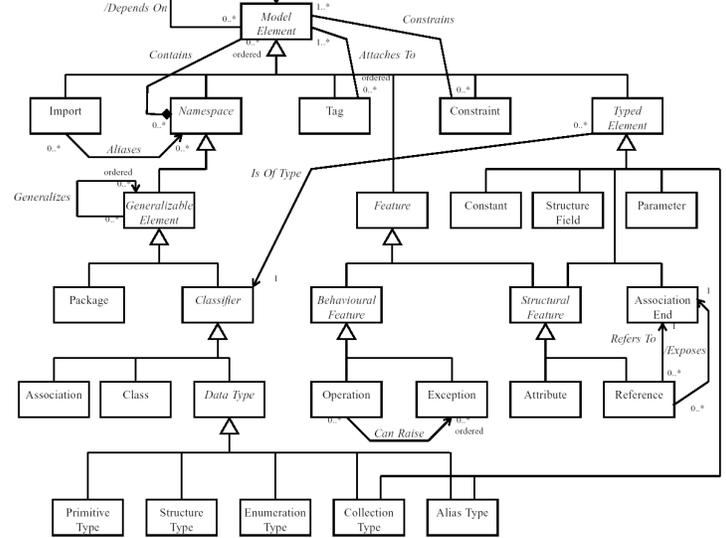
36

## MOF

- ◆ Meta Object Facilities (MOF) (version 2.0)
  - ◆ Méta-méta-modèle de référence pour l'OMG
  - ◆ Pas de syntaxe concrète
  - ◆ Aligné depuis la version 2.0 avec le « noyau » du méta-modèle d'UML 2.0
  - ◆ Décomposé en 2 parties
    - ◆ E-MOF : essentiel MOF
      - ◆ Méta-modèle noyau
    - ◆ C-MOF : complete MOF
      - ◆ Méta-modèle plus complet
  - ◆ E-MOF et C-MOF peuvent se définir mutuellement et chacun eux-mêmes
  - ◆ Définition d'un méta-modèle via le MOF
    - ◆ Méta-modèle = ensemble d'instances de méta-éléments du MOF associées entre elles

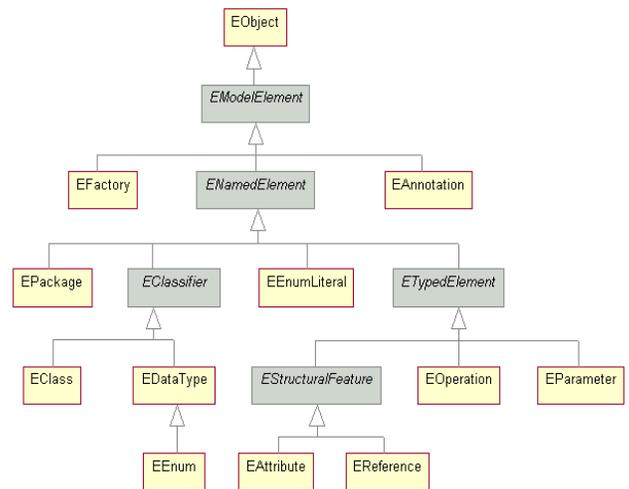
37

## MOF : méta-modèle (version 1.4)



## Ecore

- ◆ Eléments du méta-modèle Ecore



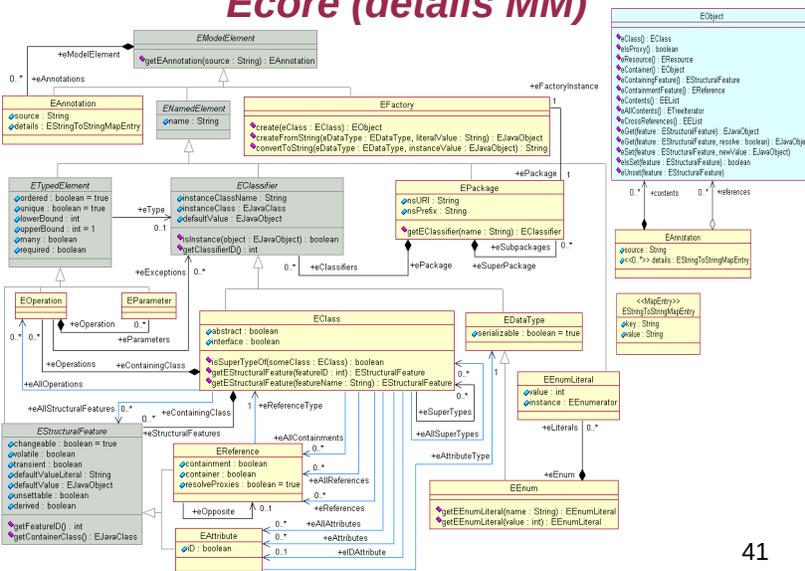
40

## Ecore

- ◆ Eclipse Modeling Framework (EMF)
  - ◆ Framework de modélisation intégré dans l'atelier de développement Eclipse (IBM) pour le langage Java
  - ◆ But : modéliser des programmes Java et travailler au niveau modèle en plus du code
  - ◆ Mais peut aussi servir à créer des modèles et des méta-modèles
- ◆ Ecore
  - ◆ Méta-modèle intégré dans EMF
  - ◆ Méta-modèle « minimal » aligné sur E-MOF

39

## Ecore (détails MM)



41