

# Ingénierie des Modèles

## Exécution de modèles

Eric Cariou

Master TIIL-A 2<sup>ème</sup> année

Université de Bretagne Occidentale

UFR Sciences & Techniques – Département Informatique

Eric.Cariou@univ-pau.fr

1

## Modèles à l'exécution

- ◆ Usage « actif »
  - ◆ Le modèle définit le (ou une partie du) comportement du système
  - ◆ Ex : une machine à états qui contrôle le fonctionnement d'un ascenseur
    - ◆ En fonction de l'interaction de l'utilisateur avec les boutons de contrôle de l'ascenseur
      - ◆ Les transitions entre les états se font via les événements générés par l'utilisateur
      - ◆ Les états définissent les opérations métier à exécuter
        - ◆ Ouverture/fermeture de portes
        - ◆ Monter/descendre à un certain étage
  - ◆ Exécution de modèle
    - ◆ Le système prend en entrée un modèle qui définit le comportement du système et l'interprète

3

## Modèles exécutables

- ◆ Dans UML
  - ◆ Les diagrammes comportementaux sont a priori exécutables
    - ◆ Machines à états, diagrammes de séquence, d'activité ...
  - ◆ Les diagrammes structurels ne le sont pas (par défaut)
    - ◆ Diagramme de classe, de composant, d'objet ...
- ◆ En IDM, peut créer ses propres langages de modélisation
  - ◆ DS(M)L : Domain Specific (Modeling) Language
  - ◆ Si on crée des langages de modèles exécutables
    - ◆ i-DSML (interpreted DSML) ou xDSL (executable DSL)

5

## Modèles à l'exécution

- ◆ L'IDM généralise l'usage des modèles partout où on peut le faire
  - ◆ Usage productif des modèles
  - ◆ Y compris dans le système en cours d'exécution
- ◆ Usage « passif »
  - ◆ Un modèle est utilisé pour représenter l'architecture du système, pour prendre des décisions...
  - ◆ Ex : *models@run.time*
    - ◆ Discipline où un modèle représente l'état courant du système
      - ◆ Lien de causalité entre le système et le modèle
    - ◆ Analyse du modèle pour détecter d'éventuels problèmes
    - ◆ En cas de problème, on adapte le système en cours d'exécution

2

## Modèles exécutables

- ◆ Deux principales variantes de l'exécution de modèle
  - ◆ Compilation de modèle
    - ◆ On traduit le contenu du modèle vers du code classique via éventuellement des frameworks dédiés
      - ◆ On a vu la génération de code Java à partir de diagrammes de classes UML
      - ◆ Mais il manque le contenu des méthodes
        - ◆ Elles peuvent être spécifiées en fUML
        - ◆ Code abstrait que l'on peut définir sur des modèles UML
  - ◆ Simulation de modèle
    - ◆ En phase de conception, on simule l'exécution du modèle
    - ◆ Permet de détecter au plus tôt des erreurs de conception
    - ◆ Le modèle simulé n'est pas (forcément) ensuite présent en tant que tel à l'exécution

4

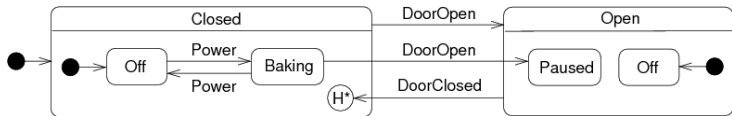
## Constituants d'un xDSL

- ◆ Éléments principaux d'un xDSL
  - ◆ Méta-modèle définissant les éléments qu'on trouvera dans le modèle
    - ◆ Partie statique
      - ◆ Pour définir le contenu métier du modèle
      - ◆ Méta-modèle « classique »
    - ◆ Partie dynamique
      - ◆ Pour définir l'état dans lequel se trouve le modèle au cours de son exécution
      - ◆ Spécifique aux xDSL
  - ◆ Sémantique d'exécution
    - ◆ Définit comment le modèle évolue au fil du temps
    - ◆ Chaque évolution = un pas d'exécution
  - ◆ Moteur d'exécution
    - ◆ Implémente la sémantique d'exécution
    - ◆ Prend en entrée un modèle et l'exécute

6

## Exemple de xDSL

- ◆ Machines à états simplifiées
  - ◆ États composites
  - ◆ État historique
- ◆ Exemple de modèle
  - ◆ Four à micro-onde
  - ◆ Événements
    - ◆ « Power » : bouton de marche/arrêt de cuisson
    - ◆ « DoorOpen » : ouverture de la porte
    - ◆ « DoorClosed » : fermeture de la porte



7

## Partie statique

- ◆ Invariants OCL pour compléter le méta-modèle
  - ◆ Une machine à états est le seul état sans container
 

```
context StateMachine inv noContainerForStateMachine:
self.container.oclIsUndefined()
```
  - ◆ Un état initial référence forcément un état
 

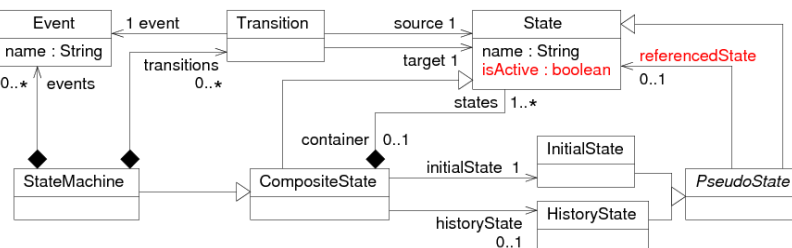
```
context State inv containerForAllStates:
not self.oclIsTypeOf(StateMachine) implies
not self.container.oclIsUndefined()
```
  - ◆ Les pseudos-états référencent un état de leur composite
 

```
context CompositeState inv pseudoStatesInComposite:
self.states->includes(self.initialState.referencedState) and
self.states->includes(self.initialState) and
not self.historyState.oclIsUndefined() implies (
self.states->includes(self.historyState) and
not self.historyState.referencedState.oclIsUndefined()
implies self.states->includes(self.historyState.referencedState) )
```

9

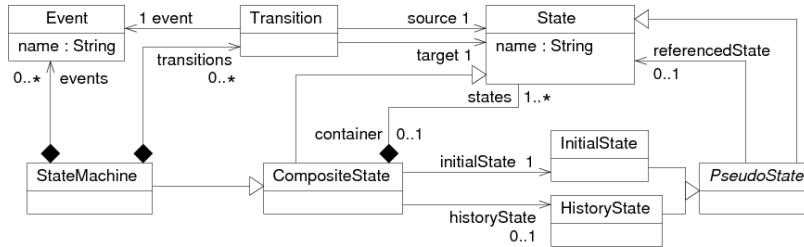
## Partie dynamique

- ◆ Définition de l'état courant du modèle en cours d'exécution
  - ◆ Quel(s) est/sont le(s) état(s) actifs
    - ◆ Rajoute un attribut booléen `isActive` dans `State`
  - ◆ Si un composite contient un état historique, il doit référencer le dernier état qui était actif
    - ◆ L'association `referencedState` sert à cela
      - ◆ Elle est statique pour un état initial (ne change pas)
      - ◆ Elle est dynamique pour un état historique (est modifiée pendant l'exécution)



## Partie statique

- ◆ Définit tous les éléments structurels « classiques »
  - ◆ État, composite, transition, état initial, historique, transition, événement ...
  - ◆ La machine à état est l'élément racine du méta-modèle
    - ◆ Instance unique dans le modèle
    - ◆ Est définie comme un composite pour définir son ensemble d'états
    - ◆ Contient en plus les événements et transitions de la machine à états



## Partie statique

- ◆ Invariants OCL sur les transitions
  - ◆ Une seule transition partant du même état avec le même événement
 

```
context Transition inv transEventSource:
Transition.allInstances()->forAll(t : Transition |
t.source = self.source and t.event = self.event implies self = t)
```
  - ◆ Pas de transition partant d'un état historique, pas de transition vers ou au départ d'un état initial ni d'une machine à états
 

```
context Transition inv transForbiddenStates:
not self.source.oclIsTypeOf(HistoryState) and
not self.source.oclIsTypeOf(InitialState) and
not self.target.oclIsTypeOf(InitialState) and
not self.source.oclIsTypeOf(StateMachine) and
not self.target.oclIsTypeOf(StateMachine)
```

10

## Partie dynamique

- ◆ Invariants OCL pour compléter la partie dynamique
- ◆ Principalement pour assurer la cohérence des états actifs
  - ◆ Si la machine à états est inactive, alors tous les états du modèle sont inactifs
  - ◆ Si elle est active, alors un et un seul de ses états contenus (premier niveau) est actif
    - ◆ Si cet état est composite, alors un et un seul de ses états est actif
      - ◆ A vérifier récursivement
    - ◆ Un état composite inactif a tous ses états inactifs et cela récursivement jusqu'à tous les états feuilles
      - ◆ Valable aussi pour la machine à états

12

## Partie dynamique

- ◆ Fonctions et attributs OCL qui vont aider à l'écriture des invariants sur la cohérence des états actifs
- ◆ Deux pseudos-attributs pour récupérer les états normaux (exclusion des pseudo états) et les composites dans l'ensemble des états d'un composite
 

```
context CompositeState def: normalStates : Set(State) =
self.states->reject(s : State | s.oclIsKindOf(PseudoState))
context CompositeState def: compositeStates : Set(State) =
self.states->select(s : State | s.oclIsKindOf(CompositeState))
```
- ◆ Un état composite ne contient aucun état actif (et récursivement)
 

```
context CompositeState def: unactiveSubTree() : Boolean =
self.normalStates->forAll(s : State | not s.isActive) and
self.compositeStates->forAll(s : State |
s.oclAsType(CompositeState).unactiveSubTree())
```
- ◆ Un état composite contient un et un seul état actif (et récursivement)
 

```
context CompositeState def: activeSubTree() : Boolean =
self.normalStates->select(s : State | s.isActive)->size() = 1 and
self.compositeStates->forAll(s : State |
if s.isActive then s.oclAsType(CompositeState).activeSubTree()
else s.oclAsType(CompositeState).unactiveSubTree()
endif)
```

13

## Sémantique d'exécution

- ◆ Spécifie la façon dont le modèle évolue durant son exécution
  - ◆ Ex : pour les machines à états, précise comment suivre les transitions en fonction de l'occurrence d'événements et des états actifs
- ◆ Plusieurs manières de spécifier la sémantique pour une exécution de modèles
  - ◆ Sémantique axiomatique
  - ◆ Sémantique translationnelle
  - ◆ Sémantique opérationnelle
- ◆ Sémantique axiomatique
  - ◆ Logique de Hoare, contrats ...
  - ◆ Définit des contraintes/propriétés qui doivent être respectées avant et après la réalisation d'un pas d'exécution
  - ◆ Ne permet pas d'implémenter un moteur d'exécution mais est utile si on veut vérifier que l'exécution se déroule correctement

15

## Sémantique d'exécution

- ◆ Sémantique opérationnelle
  - ◆ Définit de manière programmatique comment faire évoluer le modèle
  - ◆ Un moteur écrit dans un langage de programmation interprète le modèle et implémente cette sémantique
  - ◆ Exemples pour des xDSL définis en Ecore
    - ◆ Implémentation directe en Java/EMF
    - ◆ Implémentation via une transformation de modèle en ATL
      - ◆ Conceptuellement pertinent : un pas d'exécution = une transformation endogène
      - ◆ Par contre peu pratique à réaliser
        - ◆ Nécessite un moteur annexe qui lance la transformation quand par exemple un événement doit être traité par la machine à états
        - ◆ ATL est moins pratique pour coder des parties algorithmiques un peu complexes

17

## Partie dynamique

- ◆ Invariant de cohérence des états actifs de la machine à états en utilisant les fonctions précédentes
  - ◆ Soit toute la machine à états est désactivée
  - ◆ Soit elle est activée avec les mêmes règles qu'un composite
  - ◆ context StateMachine inv activeStateHierarchyConsistency:
 

```
if self.isActive
then self.activeSubTree()
else self.unactiveSubTree()
endif
```

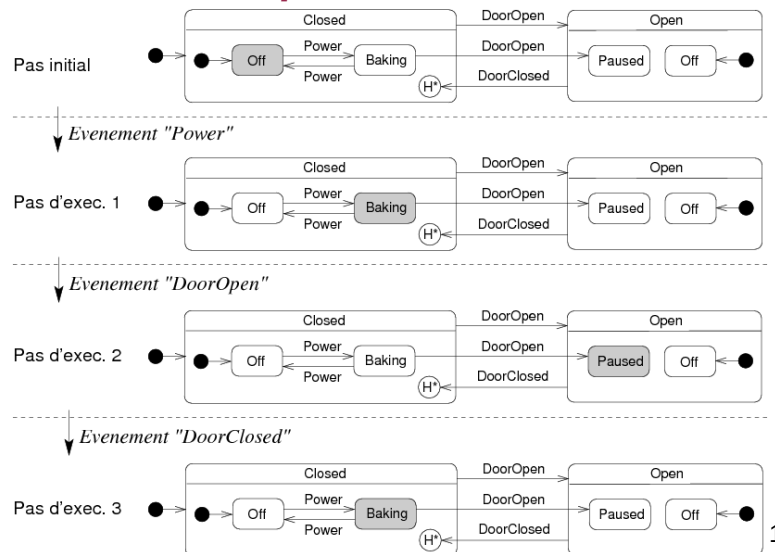
14

## Sémantique d'exécution

- ◆ Sémantique translationnelle
  - ◆ Traduit le modèle vers un autre espace technologique pour lequel il existe des outils d'exécution/simulation
    - ◆ Nécessite d'établir une correspondance sémantique entre les éléments du modèle et ceux de l'autre espace
- ◆ Différents usages
  - ◆ « compiler » un modèle
    - ◆ Ex : génération de code Java pour la librairie PauWare à partir du modèle d'une machine à états (<http://www.pauware.com>)
  - ◆ Faire de la simulation/vérification
    - ◆ Ex : traduction du modèle en un réseau de Petri ou génération de spécification formelle en B pour utiliser des outils de vérification dédiés

16

## Ex. séquence d'exécution



18

## Ex. séquence d'exécution

- ◆ Pas initial
  - ◆ Active les états initiaux de la machine à états
  - ◆ Ici, l'instance de la machine à états, le composite « Closed » et l'état « Off » auront tous trois leur attribut `isActive` à vrai
- ◆ Pas d'exécution
  - ◆ Pour un événement, s'il existe une transition à suivre par rapport aux états actifs, change les états actifs
    - ◆ Réalise un pas d'exécution
    - ◆ Seule la partie dynamique du modèle est modifiée par l'exécution
      - ◆ Modifier la partie statique = rajouter/supprimer/modifier des états ou des transitions = modifier le contenu métier du modèle
- ◆ Entre pas 1 et 2, pour l'événement « DoorOpen »
  - ◆ Deux transitions éligibles : de « Baking » vers « Paused », de « Closed » vers « Open »
  - ◆ Sémantique UML : suit la plus interne (comme sur la figure)
  - ◆ Sémantique statecharts de Harel : suit celle entre les deux composites

19

## Sém. op. : historiques et initialisation

```
// Positionne l'état en paramètre comme référencé par
// l'éventuel état historique que contient son composite
public void setAsHistory(State s) {
    if (s.getContainer() != null) {
        if (s.getContainer().getHistoryState() != null)
            s.getContainer().getHistoryState().setReferencedState(s);
    }
}

//Initialise la machine à états en activant tous les états initiaux
public void initStateMachine(StateMachine sm) {
    sm.setIsActive(true);
    State s = sm.getInitialState().getReferencedState();
    while (s != null) {
        s.setIsActive(true);
        this.setAsHistory(s);
        if (s instanceof CompositeState)
            s = ((CompositeState)s).getInitialState().getReferencedState();
        else s = null;
    }
}
```

21

## Sém. op. : activation hiérarchie

```
// Active la hiérarchie haute d'un état
public void activateUpStateHierarchy(State s) {
    State up = s.getContainer();
    while (up != null) {
        up.setIsActive(true);
        this.setAsHistory(up);
        up = up.getContainer();
    }
}

// Active la hiérarchie basse d'un état
public void activateDownStateHierarchy(State s) {
    if (s instanceof CompositeState) {
        State init = ((CompositeState)s).getInitialState().getReferencedState();
        init.setIsActive(true);
        this.setAsHistory(init);
        if (init instanceof CompositeState) this.activateDownStateHierarchy(init);
    }
}

// Active toute la hiérarchie d'un état
public void activateStateHierarchy(State s) {
    s.setIsActive(true);
    this.setAsHistory(s);
    this.activateUpStateHierarchy(s);
    this.activateDownStateHierarchy(s);
}
```

23

## Sémantique opérationnelle

- ◆ Pour notre méta-modèle de machines à états, il faut définir un ensemble de méthodes Java
  - ◆ Rendre toute une hiérarchie d'états inactive
  - ◆ Activer une hiérarchie d'états conformément aux règles décrites précédemment
    - ◆ En positionnant les états historiques des composites s'ils existent
  - ◆ Initialiser la machine à états : activer les états initiaux
  - ◆ Rechercher s'il existe une transition partant de l'état actif racine ou un de ses super-états pour un événement
  - ◆ Traiter l'occurrence d'un événement
    - ◆ Suivre la transition requise si elle existe en modifiant la hiérarchie des états actifs
    - ◆ Désactive la hiérarchie de l'état source et active celle du cible

20

## Sém. op. : désactivation hiérarchie

```
// Désactive la hiérarchie haute d'un état
public void unactivateUpStateHierarchy(State s) {
    State up = s.getContainer();
    while (up != null) {
        up.setIsActive(false);
        up = up.getContainer();
    }
}

// Désactive la hiérarchie basse d'un état
public void unactivateDownStateHierarchy(State s) {
    if (s instanceof CompositeState)
        for (State down : ((CompositeState)s).getStates()) {
            down.setIsActive(false);
            if (down instanceof CompositeState)
                this.unactivateDownStateHierarchy(down);
        }
}

// Désactive un état et toute sa hiérarchie
public void unactivateStateHierarchy(State s) {
    s.setIsActive(false);
    this.unactivateUpStateHierarchy(s);
    this.unactivateDownStateHierarchy(s);
}
```

22

## Sém. op. : recherche transition

```
// Retourne l'état actif le plus en bas de la hiérarchie
public State getLeafActiveState(CompositeState comp) {
    for (State s : comp.getStates())
        if (s.isActive())
            if (s instanceof CompositeState)
                return this.getLeafActiveState(((CompositeState)s));
            else return s;
    return null;
}

// Retourne la transition partant de l'état actif le plus bas pour l'événement
// précisé ou null si aucune transition n'a été trouvée
public Transition getTriggerableTransition(String evt, StateMachine sm) {
    boolean fini = false;
    State activeState = this.getLeafActiveState(sm);
    Transition trans = null;
    while(!fini) {
        for (Transition t : sm.getTransitions())
            if (t.getEvent().getName().equals(evt) && (activeState == t.getSource())) {
                trans = t;
                fini = true;
            }
        if (!fini) {
            activeState = activeState.getContainer();
            if (activeState == null) fini = true;
        }
    }
    return trans;
}
```

24

## Sém. op. : traitement d'un événement

```
// Traite un événement : recherche une transition à suivre puis si elle
// existe, désactive la hiérarchie de l'état source puis modifie
// la hiérarchie des états actifs à partir de la cible de la transition
// en prenant en compte le cas où la cible est un état historique
public void processEvent(String event, StateMachine sm) {
    Transition trans = this.getTriggerableTransition(event, sm);
    if (trans != null) {
        this.unactivateStateHierarchy(trans.getSource());
        State target = trans.getTarget();
        if (target instanceof HistoryState) {
            State histState = ((HistoryState)target).getReferencedState();
            if (histState == null)
                target =
                    target.getContainer().getInitialState().getReferencedState();
            else target = histState;
        }
        this.activateStateHierarchy(target);
    }
}
```

25

## Exécution de diagrammes UML

- ◆ A la base, la spécification UML n'avait pas prévu d'exécuter les modèles comportementaux
  - ◆ Aucune partie dynamique pour aucun de ces diagrammes
    - ◆ Pas obligatoire mais dans ce cas c'est le moteur d'exécution qui gère lui même en interne l'état courant du modèle en cours d'exécution
  - ◆ Une sémantique d'exécution définie informellement et partiellement en anglais
- ◆ Aujourd'hui, plusieurs spécifications OMG pour faire de l'exécution de diagrammes UML
  - ◆ fUML : sémantique d'exécution de diagrammes d'activités
    - ◆ Peut définir le comportement exécutable d'une méthode d'une classe ou autre chose
    - ◆ ALF : syntaxe textuelle concrète de fUML similaire à celle d'un langage de programmation
  - ◆ PSCS : sémantique d'exécution des structures composites
  - ◆ PSSM : sémantique d'exécution des machines à états

27

## PauWare : micro-onde

- ◆ Implémentation en Java/PauWare de l'exemple du micro-onde
  - ◆ Ajout d'un objet métier gérant le micro-onde
    - ◆ Lumière : éteinte ou allumée
    - ◆ Magnétron : en marche ou arrêté
    - ◆ Porte : ouverte ou fermée
  - ◆ Ensemble d'opérations métier pour modifier l'état de ces éléments
  - ◆ Création ensuite du comportement avec l'API PauWare
    - ◆ La hiérarchie des états avec des opérations métier associées aux états
    - ◆ Des transitions entre les états avec là aussi des opérations métiers associées

29

## Sémantique opérationnelle

- ◆ Moteur d'exécution en Java/EMF des machines à états
  - ◆ Exécute bien les modèles, fait évoluer les états actifs conformément à la sémantique d'exécution à chaque occurrence d'événement
    - ◆ Mais ... c'est tout !
  - ◆ Il manque les opérations métiers associées aux états, les gardes aux transitions ...
- ◆ Solutions
  - ◆ Rajouter au méta-modèle de quoi spécifier des opérations
    - ◆ Nécessite de la structure : variables, classes, types ...
    - ◆ Nécessite un langage d'action : affectations, calculs, tests, boucles ...
    - ◆ En gros : modéliser un langage de programmation
  - ◆ Se contenter de représenter le comportement en pouvant rajouter le métier à coté
    - ◆ Les machines à états en PauWare exécutent des méthodes Java standard qui implémentent la partie métier

26

## PauWare

- ◆ PauWare : <http://www.pauware.com>
  - ◆ Librairie Java permettant de « programmer » des machines à états
  - ◆ Implémente la sémantique des machines à états UML 2.X
    - ◆ États imbriqués, concurrents
    - ◆ Opérations associées aux états (en entrée, sortie et son activité)
    - ◆ Gestion des gardes et des opérations des transitions
    - ◆ ...
- ◆ Equivalence entre machine à états UML et code Java PauWare
  - ◆ Le modèle (machine à état ici) est entièrement et totalement présent dans le code et est une partie du code
    - ◆ Le comportement dynamique est spécifié par la machine à état
    - ◆ La logique métier est implémentée dans les opérations associées aux états et aux transitions
  - ◆ L'exécution du programme consiste à exécuter la machine à état
    - ◆ Via le moteur PauWare

28

## Micro-onde : classe métier

```
public class MicrowaveBusiness {
    private boolean lightOn = false;
    private boolean doorOpen = false;
    private boolean magnetronOn = false;

    public void stop() {
        lightOn = false;
        magnetronOn = false;
    }

    public void heat() {
        lightOn = true;
        magnetronOn = true;
    }

    public void pause() {
        magnetronOn = false;
        lightOn = true;
    }

    public void openDoor() {
        doorOpen = true;
    }

    public void closeDoor() {
        doorOpen = false;
    }

    public String toString() {
        return "[ Light on: "+lightOn+", magnetron on: "+magnetronOn+", door open: "+doorOpen+ " ]";
    }
}
```

30



## Micro-onde : machine à états

```
public class MicrowaveStateMachine {
    // les états de la machine à états
    protected AbstractStatechart open;
    protected AbstractStatechart closed;

    protected AbstractStatechart offOpen;
    protected AbstractStatechart offClosed;
    protected AbstractStatechart baking;
    protected AbstractStatechart paused;

    // la machine à états
    protected AbstractStatechart_monitor stateMachine;

    public void buildAndStartMicrowave(MicrowaveBusiness mwb)
        throws Statechart_exception {

        // création des états simple avec associations des activités métiers
        // et précision si un état est un état initial de son composite
        offOpen = new Statechart("Off");
        offOpen.doActivity(mwb, "stop");
        offOpen.inputState();
        ...
    }
}
```

31

## Micro-onde : machine à états

```
...
offClosed = new Statechart("Off");
offClosed.doActivity(mwb, "stop");
offClosed.inputState();

baking = new Statechart("Baking");
baking.doActivity(mwb, "heat");

paused = new Statechart("Paused");
paused.doActivity(mwb, "pause");

// création des 2 états composites avec un history state pour Closed
closed = offClosed.xor(baking).name("Closed");
closed.deep_history();
closed.inputState();

open = offOpen.xor(paused).name("Open");

// création de la machine à états
stateMachine = new Statechart_monitor(closed.xor(open), "Microwave", true);
...
}
```

32

## Micro-onde : machine à états

```
...
// création des transitions entre états avec des opérations métier
// pour gérer l'ouverture de la porte
stateMachine.fires("DoorOpen", closed, open, true, mwb, "openDoor");
stateMachine.fires("DoorOpen", baking, paused, true, mwb, "openDoor");
// transition implicite vers l'état historique de Closed :
stateMachine.fires("DoorClosed", open, closed, true, mwb, "closeDoor");
stateMachine.fires("Power", offClosed, baking);
stateMachine.fires("Power", baking, offClosed);

// démarre la machine à états
stateMachine.start();
}

public void stopMicrowave() throws Statechart_exception {
    stateMachine.stop();
}

public void runEvent(String name, MicrowaveBusiness mwb) throws Exception {
    // traite l'occurrence d'un événement en exécutant les transitions et
    // opérations requises
    stateMachine.run_to_completion(name);
    System.out.println("Etat métier après "+name+ " : "+mwb);
}
}
```

33

## Micro-onde : exécution

- ◆ Si on exécute ce code :

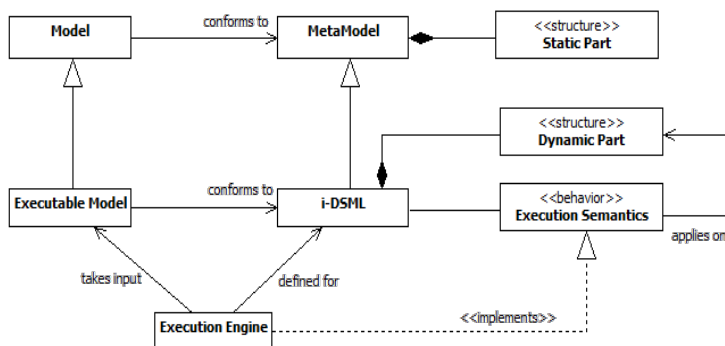
```
MicrowaveStateMachine sm = new MicrowaveStateMachine();
MicrowaveBusiness business = new MicrowaveBusiness();
sm.buildAndStartMicrowave(business);
sm.runEvent("Power", business);
sm.runEvent("DoorOpen", business);
sm.runEvent("Power", business);
sm.runEvent("Foo", business);
sm.runEvent("DoorClosed", business);
sm.runEvent("Power", business);
sm.stop();
```

- ◆ Donne la trace d'exécution suivante :

```
Etat métier après Power : [ Light on: true, magnetron on: true, door open: false ]
Etat métier après DoorOpen : [ Light on: true, magnetron on: false, door open: true ]
Etat métier après Power : [ Light on: true, magnetron on: false, door open: true ]
Etat métier après Foo : [ Light on: true, magnetron on: false, door open: true ]
Etat métier après DoorClosed : [ Light on: true, magnetron on: true, door open: false ]
Etat métier après Power : [ Light on: false, magnetron on: false, door open: false ]
```

34

## Résumé constituants d'un xDSL



35