

SED - Modèles et modélisation

Formation Systèmes à Événements Discrets

1ère édition
Janvier 2024



1 Introduction

- Qu'est-ce qu'un modèle ?
- Caractérisation des événements

2 Comment obtenir un modèle ?

- Méthodologie de construction
- Illustration
- Quelques remarques pour conclure

3 Différents besoins de modélisation

4 Conclusion

Qu'est-ce qu'un modèle ?

1. Qu'est-ce qu'un modèle? 1/3

Rappelons ce que nous avons proposé en *introduction* de cette formation

Définitions informelles (rappel)

Un **système** est un ensemble d'éléments interagissant entre eux et avec leur environnement afin de réaliser une fonction

Un **modèle** est une représentation du système afin de réaliser un objectif donné

1. Qu'est-ce qu'un modèle ? 1/3

- Un modèle est obtenu dans un **objectif** précis : contrôle, diagnostic, vérification, sécurité...
- Il s'agit d'une **abstraction** de la réalité qui ne représente pas la totalité du système représenté : hypothèses simplificatrices, éléments non pris en compte car non nécessaires pour atteindre l'objectif...
- Plusieurs modèles peuvent représenter un même système : ils diffèrent par leurs objectifs de modélisation, le niveau d'abstraction recherché...

1. Qu'est-ce qu'un modèle ? 3/3

Un modèle est décrit dans un certain **formalisme** (mathématique, graphique, descriptif...)

Ceux vus jusqu'à présent :

- Les formalismes "classiques" : automate, langage, réseau de Petri, logique booléenne
- Quelques extensions temporelles : automate temporisé, réseau de Petri temporel et temporisé, graphe d'événements temporisés et $(\max, +)$

Caractérisation des événements

1. Caractérisation des événements 1/4

Les événements manipulés dans un modèle ont de nombreuses caractéristiques qui dépendent

- De leurs natures
- De leurs rôles par rapport au système
- Des objectifs de la modélisation

1. Caractérisation des événements 2/4

Caractérisation des événements selon leurs natures

- Capteur, actionneur... : si système matériel, industriel, de transport...
- Message, communication... : pour les parties digitales des systèmes, les systèmes informatiques et réseaux...
- Action non matérielle : pour les modèles représentatifs des comportements humains, des propagations des maladies, d'astronomie, d'économie...
- Aléa (événement spontané) : lorsqu'une panne survient
- ...

1. Caractérisation des événements 3/4

Caractérisation des événements selon leurs interactions à l'intérieur du système ou selon l'interaction du système avec son environnement

- Événement endogène (interne) ou exogène (externe) au système ?
- Événement d'entrée ou de sortie du système ?

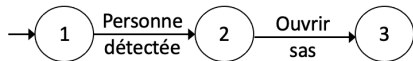


Figure – Automate de Mealy

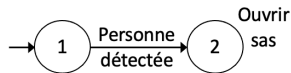


Figure – Automate de Moore

1. Caractérisation des événements 4/4

Caractérisation des événements d'après les informations du système étudié et selon les objectifs de la modélisation

- **Contrôlable - Non Contrôlable**
 - Peut-on agir sur l'événement ?
 - Information utile (par exemple) dans un objectif de *contrôle-commande*
- **Observable - Non Observable**
 - A-t-on accès à la valeur de l'événement ?
 - Information utile (par exemple) dans un objectif de *diagnostic*

1 Introduction

- Qu'est-ce qu'un modèle ?
- Caractérisation des événements

2 Comment obtenir un modèle ?

- Méthodologie de construction
- Illustration
- Quelques remarques pour conclure

3 Différents besoins de modélisation

4 Conclusion

Méthodologie de construction d'un modèle

2. Présentation de la méthodologie

Deux macro-étapes pour cette méthodologie

A - Vision globale du système

De l'objectif de la modélisation à l'identification des types d'éléments du système

Description de type *boîte noire* du système

B - Vision comportementale du système

Il s'agit d'associer des modèles comportementaux basés sur les formalismes SED aux éléments précédemment identifiés

Description de type *boîte grise* voire *boîte blanche* du système

Démarche générale

2. Démarche générale

A - Vision globale du système

1. Définir l'objectif de la modélisation
2. Définir les frontières du système (spatiales, temporelles si besoin)
3. Dédire le niveau de granularité par rapport à l'objectif

B - Vision comportementale du système

4. Définir les éléments du système et les interactions entre ces éléments pour atteindre l'objectif et le niveau de granularité
5. Définir les événements et les états du système
6. Choisir un formalisme et modéliser

Boucler sur étape 4 tant que l'objectif n'est pas atteint

A - Vision globale du système

1. Définir l'objectif de la modélisation

L'exploitation d'un modèle permet de répondre à une question : que veut-on faire avec ce modèle ?

Exemples d'objectifs

- Analyse du système
- Pilotage selon certaines spécifications
- Vérification de propriétés
- Diagnostic de pannes, prévision des prochaines défaillances
- Protection contre les intrusions
- Organisation de l'ordre des tâches à accomplir

1. Définir l'objectif de la modélisation

Exemples de sous-questions parmi ces objectifs

- Combien de ressources faut-il mettre pour réaliser cet usinage ?
- Comment contrôler le système, éviter les situations de blocage ?
- Où mettre les stocks et quelle doit être leur capacité ?
- Peut-on être sûr que tel état dangereux n'est jamais atteint ?
- Peut-on détecter et localiser les pannes ?
- Quoi ajouter au système pour éviter les intrusions malveillantes ?
- Quelle règle adopter pour choisir l'ordre de traitement des produits ?

2. Définir les frontières du système (spatiales, temporelles)

Il s'agit de définir les limites physiques du système étudié

Exemples

- Usine : simple ligne de production ? Ensemble de lignes ? Atelier de production ? Usine complète ?
- Réseau informatique : réseau local ? Réseau extérieur ?
- Système de transport : réseau routier d'une agglomération ? D'un département ? D'un pays ?

2. Définir les frontières du système (spatiales, temporelles)

Les limites temporelles (l'horizon temporel) servent notamment pour observer l'évolution du système dans le cadre d'une simulation ou d'une évaluation de performances...

Exemples

- 1 journée de 8h ou 1 semaine de 35h
- Quelques secondes ou quelques millisecondes
- Plusieurs semaines

Remarque : pas toujours nécessaire, à voir selon l'objectif

3. Déduire le niveau de granularité par rapport à l'objectif

Jusqu'où aller dans le système pour renseigner le modèle afin d'atteindre l'objectif

Exemples

- Un îlot de 4 machines : considérer l'îlot (= 1 ressource avec une capacité de 4) ou les 4 machines séparément (si besoin de différencier le comportement individuel des machines) ?
- Un vérin : considérer ses positions limites (rentré, sorti), ses positions intermédiaires (en train de rentrer, en train de sortir), la cinématique de déplacement ?
- Mise à jour logicielle : considérer la mise à jour générale (qui exécute des mises à jour d'autres logiciels) ou toutes les mises à jour de tous les logiciels ?

3. Déduire le niveau de granularité par rapport à l'objectif

Qui peut le plus peut le moins mais attention à l'effort requis pour élaborer le modèle

Expressivité : obtenir un modèle représentatif du système afin d'atteindre l'objectif

Concision : trouver le nombre minimal d'informations à mettre dans un modèle permettant d'atteindre l'objectif

Généralement

Un bon niveau de granularité est celui qui permet de trouver un modèle suffisamment expressif et le plus concis possible

B - Vision comportementale du système

4. Définir les éléments du système et les interactions entre ces éléments pour atteindre l'objectif en fonction du niveau de granularité

Quels sont les **éléments** qui composent le système et dont nous avons besoin pour atteindre l'objectif dans le niveau de granularité préalablement décidé ?

Quels sont les **interactions** entre ces éléments ?

4. Définir les éléments du système et les interactions entre ces éléments pour atteindre l'objectif en fonction du niveau de granularité

Exemples d'éléments et d'interactions

- Atelier de production : combien de machines, d'opérateurs, de types de pièces... ? quelles sont leurs interactions ?
- Système de communication : combien d'interlocuteurs, de canaux de communication, quel type d'échange... ?
- Système de transport : quels sont les types de voies, combien de voies différentes, quelles sont les intersections, dans quel sens vont les véhicules ?
- Jeu d'échec : composition du plateau, combien de pièces, quelle pièce peut prendre quelle pièce adverse ?

5. Définir les événements et les états du système

Etats : Découpage systématique du système¹ par **zone** et identification de toutes les **situations** (à l'arrêt, en activité...) et **positions** (ouvert, fermé... positionnement des éléments)

Exemples d'états

- Zones 1, 2, 3 du convoyeur libre/occupé
- A l'étage 1, à l'étage 2
- Machine à l'arrêt/en activité, libre/occupée

1. Attention au niveau de granularité

5. Définir les événements et les états du système

Evénements : A partir des **éléments** du système et de leurs **interactions** ; A partir des états définis (comment passer d'un état à un autre ?)

Exemples d'événements

- Arrivée d'un produit sur une machine
- Entrée d'un objet dans une zone
- Envoi d'un message
- Démarrage d'une procédure

6. Choisir un formalisme et modéliser

Le choix du formalisme dépend de l'objectif, du niveau de granularité, de la structure du système... ainsi que de l'expertise de la personne/équipe qui modélise

La modélisation fait appel à des mécanismes :

- Approche ascendante, descendante, mixte...
- Hiérarchisation, encapsulation...
- Automates : compositions synchrone, parallèle...
- Réseaux de Petri : fusion de places ou de transitions, requêtes/accusés de réception...
- Éléments fréquemment utilisés : ressources libres/occupées, ressources partagées...

Boucler sur 4.

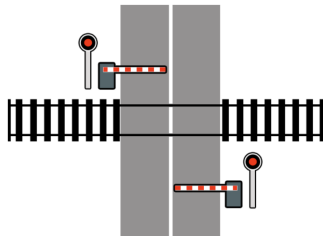
Tant que l'expressivité du modèle n'est pas satisfaisante

Comment savoir si l'objectif est atteint ? Méthodes propres à chaque objectif (contrôle, diagnostic...) et à chaque formalisme (analyse de propriétés...)

Illustration de cette méthodologie par un exemple

2. Illustration

Exemple d'un **passage à niveau** : une route à deux voies de circulation est traversée par une voie ferrée ; un passage à niveau avec deux demi-barrières protège cette intersection



2. Illustration

1. Définir l'objectif de la modélisation

Objectif : Vérification de situations

Existe-t-il une ou des situations dangereuses qui peuvent se produire ?

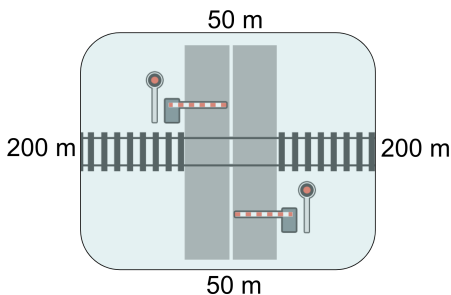
A priori oui : la barrière est ouverte, un véhicule s'engage mais n'a pas la place de franchir le passage à niveau car un autre véhicule l'en empêche (bouchon) puis un train approche et la barrière se ferme

2. Illustration

2. Définir les frontières du système (spatiales, temporelles)

Limites physiques :

- 200 mètres avant et après le passage à niveau pour les trains
- 50 mètres avant et après le passage à niveau pour les véhicules



Les limites temporelles sont inutiles pour cet objectif

2. Illustration

3. Déduire le niveau de granularité par rapport à l'objectif

Niveau de détails : les objets sont étudiés dans leur ensemble

- Véhicule (mais pas roue)
- Train (mais pas locomotive ni wagons)
- Barrières
- Voies de circulation
- Voie ferrée
- Passage à niveau

2. Illustration

4. Définir les éléments du système et les interactions entre ces éléments pour atteindre l'objectif en fonction du niveau de granularité

Eléments

- Des véhicules et des trains
- 2 demi-barrières
- 2 voies de circulation, 1 voie ferrée
- 1 passage à niveau

2. Illustration

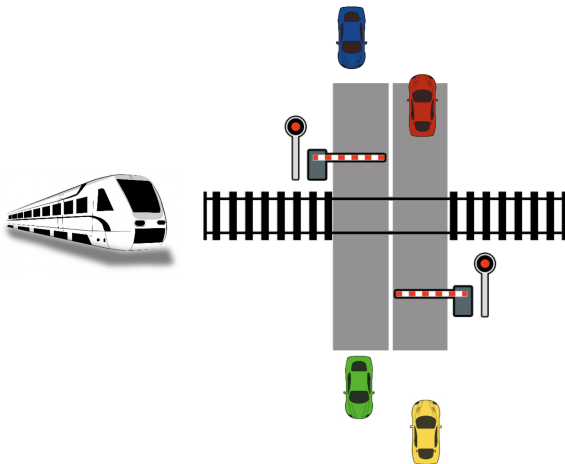
4. Définir les éléments du système et les interactions entre ces éléments pour atteindre l'objectif en fonction du niveau de granularité

Interactions

- Plusieurs véhicules sur les voies de circulation dans les deux sens
- Un seul train dans un sens sur la voie ferrée
- Lorsque le train s'approche du passage à niveau, les barrières se ferment ; lorsqu'il s'éloigne, les barrières se relèvent
- Un véhicule s'arrête devant la barrière si elle est fermée (et le véhicule suivant s'arrête derrière, etc.)

2. Illustration

4. Définir les éléments du système et les interactions entre ces éléments pour atteindre l'objectif en fonction du niveau de granularité



2. Illustration

5. Définir les événements et les états du système

Etats des éléments du système (zones, situations, positions et positionnements)

- 2 positions possibles pour les barrières² : B ouverte, B fermée
- 3 zones pour le train : ZT1 (zone à gauche du passage à niveau), ZT2 (zone du passage à niveau), ZT3 (zone à droite du passage à niveau)
- 5 zones pour chaque voie de circulation³ : ZV1, ZV2 (juste devant le passage à niveau), ZV3 (zone du passage à niveau), ZV4 (juste après le passage à niveau), ZV5
- Etat des zones : zone libre, zone occupée

2. Positions de la barrière de la voie de droite, idem pour l'autre barrière

3. Zones de la voie de droite indiquée, idem pour la voie de gauche

2. Illustration

5. Définir les événements et les états du système

Interactions entre zones et véhicules/trains ⁴

- Passage de zone en zone pour les véhicules :
ZV1->ZV2->ZV3->ZV4->ZV5
- Passage de zone en zone pour les trains : ZT1->ZT2->ZT3
- Entrées et sorties des véhicules et des trains dans les limites spatiales
- Impossibilité pour un véhicule/train d'aller dans une zone occupée par un autre véhicule/train

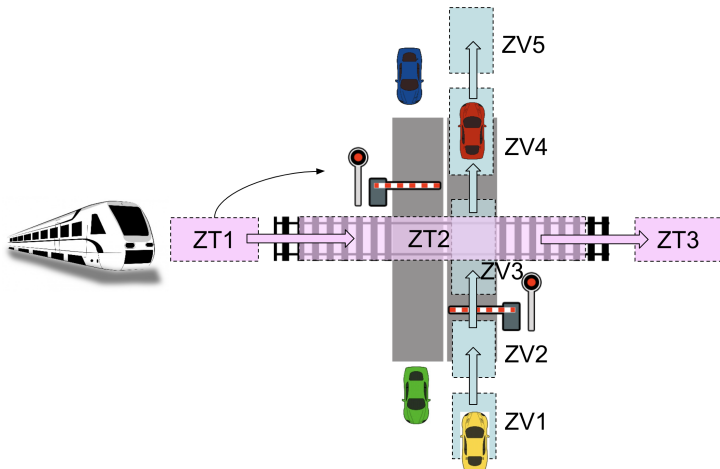
Interactions entre barrières et véhicules/trains

- Interdiction pour un véhicule d'aller en ZV3 si barrière fermée
- Fermeture barrière si train en ZT1 ; ouverture si train en ZT3 (sens gauche/droite de la figure)

4. Idem pour autre voie de circulation des véhicules et autre sens de circulation pour le train

2. Illustration

5. Définir les événements et les états du système



5. Définir les événements et les états du système

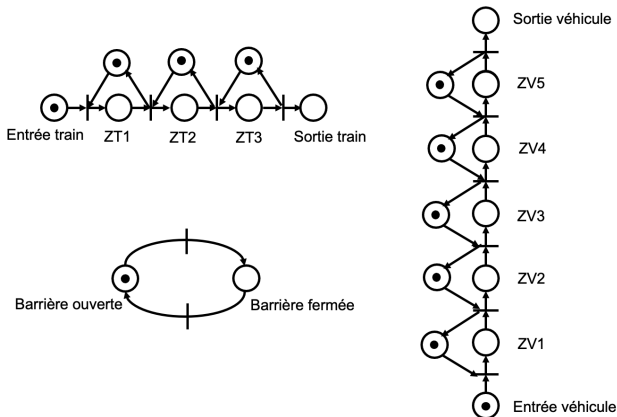
Evénements A partir des éléments du système et de leurs interactions ; A partir des états définis (comment passer d'un état à un autre ?)

- Fermeture barrière ; ouverture barrière
- Passage zone ZVi vers ZVj pour les véhicules
- Passage zone ZTk vers ZTl pour le train

2. Illustration

6. Choisir un formalisme et modéliser

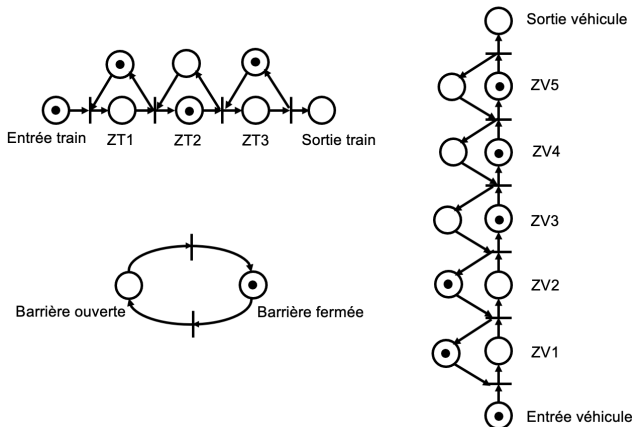
Choix des réseaux de Petri avec une première modélisation par composant :
un réseau de Petri pour chaque voie de circulation, un autre pour la
barrière de cette voie, un autre pour la voie ferrée



2. Illustration

6. Choisir un formalisme et modéliser

Marquage d'une situation dangereuse : la barrière est fermée, un train et un véhicule sont dans la zone du passage à niveau (ZT2 et ZV3), d'autres véhicules sont dans les zones après le passage (ZV4 et ZV5)



2. Illustration

Boucler sur 4. ?

Rappel de l'objectif : savoir s'il existe une ou des situations dangereuses qui peuvent se produire

L'objectif est-il atteint ? L'expressivité du modèle est-elle satisfaisante ?

Quelques remarques pour conclure cette méthodologie

2. Quelques remarques pour conclure cette méthodologie

- Un modèle universel n'existe pas, mais on peut trouver un modèle plus expressif qui répond à plusieurs questions/objectifs
- Le découpage des états peut également se faire sous une forme matricielle *position* (zone 1, zone 2...) / *vitesse* (vers la droite, à l'arrêt, vers la gauche...)

Ce découpage systématique peut être très efficace lorsque la physique du système le permet

2. Quelques remarques pour conclure cette méthodologie

- Attention à la difficulté d'appliquer des outils et des procédures sur le modèle obtenu

Décidabilité : obtenir un modèle sur lequel les procédures appliquées (vérification, commande, atteignabilité...) se terminent à tous les coups (même si elles doivent durer très longtemps)

Du point de vue pratique

Un bon compromis est celui du modèle le plus décidable, suffisamment expressif et le plus concis possible

*Question subsidiaire :
si la procédure à exécuter est décidable,
quelle est la complexité de sa réalisation ?*

1 Introduction

- Qu'est-ce qu'un modèle ?
- Caractérisation des événements

2 Comment obtenir un modèle ?

- Méthodologie de construction
- Illustration
- Quelques remarques pour conclure

3 Différents besoins de modélisation

4 Conclusion

Différents besoins de modélisation

3. Différents besoins de modélisation

De nombreux formalismes permettent de modéliser les SED

- Les "classiques" : automate, langage, réseau de Petri, logiq. booléenne

De la machine à café aux systèmes à grande échelle

- Quelques extensions temporelles : automate temporisé, réseau de Petri temporel et temporisé, graphe d'événements temporisés et $(\max, +)$

Lorsque les durées et les délais ont leur importance

- Des modèles hybrides : mélange de continu et de discret où les variables d'états continues côtoient les événements discrets

Pour les systèmes qui mélangent naturellement ces deux aspects

- Des modèles incertains : intervalles de temps, modèles stochastiques ou probabilistes

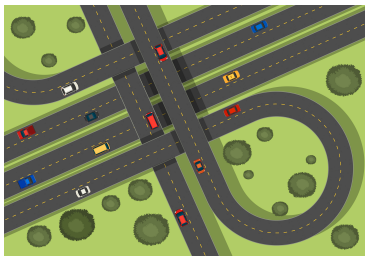
Des incertitudes pour saisir des imperfections

Quel modèle pour quel système et quel objectif ?

3. Quel modèle pour quel système et quel objectif?

Circulation routière

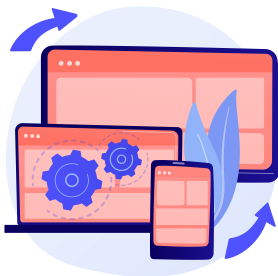
- Gestion des flux de véhicules
- Gestion des aléas (accident, travaux, grève...)



3. Quel modèle pour quel système et quel objectif?

Mise à jour logicielle

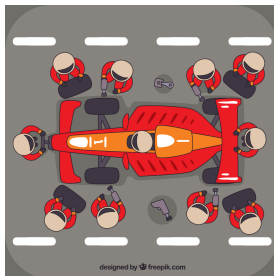
- Fermeture des applications, déconnexion aux documents partagés, ...
- On sait quand la mise à jour démarre mais pas quand elle se termine



3. Quel modèle pour quel système et quel objectif ?

Arrêt au stand d'une voiture de formule 1

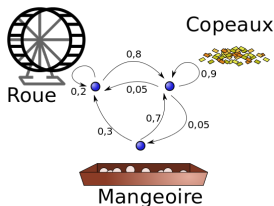
- Représentation des actions des personnels du paddock lors de l'arrêt
- Choix des arrêts des véhicules en fonction des tours réalisés, de la météo, de l'état des pneus, des concurrents...



3. Quel modèle pour quel système et quel objectif?

Doudou le hamster⁵ ne connaît que trois endroits dans sa cage : les copeaux où il dort ; la mangeoire où il mange ; la roue où il fait de l'exercice

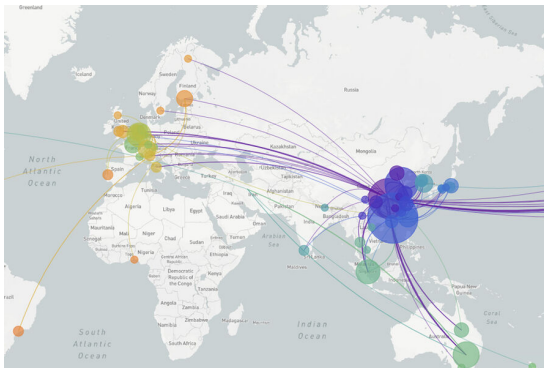
- Quand il se réveille, il peut aller manger ou il part faire de l'exercice
- Après avoir mangé, il peut courir dans sa roue ou retourner dormir
- Courir est fatigant pour Doudou ; il peut aller dormir au bout d'une minute ou il continue en oubliant qu'il est déjà un peu fatigué



5. Source : Wikipédia, article sur les chaînes de Markov

3. Quel modèle pour quel système et quel objectif?

Mars 2020, schéma issu du logiciel Nextstrain⁶ "qui permet de suivre en temps réel l'évolution des agents pathogènes et d'obtenir une cartographie [...] de la propagation d'une maladie"

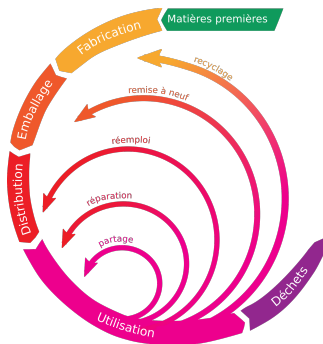


6. Source : Site web L'usine digitale

3. Quel modèle pour quel système et quel objectif ?

Exemple d'un schéma du cycle de vie d'un produit ⁷ en économie circulaire

- Différentes étapes dans la vie d'un produit
- Utilisation de nombreuses boucles pour qualifier le "re-quelque chose" (réparation, réemploi, remise à neuf, recyclage)



7. Source : Wikipédia, article sur l'économie circulaire

3. Quel modèle pour quel système et quel objectif?

- Distributeur de café/thé/déca
- Système de cuves
- Allumage d'une lumière
- Processus de fabrication d'une pizza
- Comportement humain à domicile (MAD = maintien à domicile)
- Gestion d'un hôpital (optimisation des urgences, logistique hospitalière)
- ...

1 Introduction

- Qu'est-ce qu'un modèle ?
- Caractérisation des événements

2 Comment obtenir un modèle ?

- Méthodologie de construction
- Illustration
- Quelques remarques pour conclure

3 Différents besoins de modélisation

4 Conclusion

Conclusion

Discussion autour des modèles et des besoins de formalisation

Proposition d'un guide méthodologique à adapter en fonction des besoins

Equipe pédagogique

Auteur.rice.s : Pascal Berruet, Gregory Faraut, Euriell Le Corrond, Pascale Marangé

Intervenant.e.s : Pascal Berruet, Gregory Faraut, Euriell Le Corrond