

Projet Bonaventure

Livrable 3 : modélisation du domaine

Table des matières

I- Description de la méthodologie	3
II- Modélisation du domaine	3
1- Niveau racine.....	4
a) Identification des entités du domaine	4
b) Illustration	6
2- Premier niveau de raffinement	7
a) Identification des entités du domaine	7
b) Illustration	9
3- Deuxième niveau de raffinement	10
a) Identification des entités du domaine	10
b) Illustration	12
4- Troisième niveau de raffinement	13
a) Identification des entités du domaine	13
b) Illustration	18
5- Quatrième niveau de raffinement.....	19
a) Identification des entités du domaine	19
b) Illustration	21
6- Cinquième niveau de raffinement	22
a) Identification des entités du domaine	22
b) Illustration	25
Références	26

Table des illustrations

<i>Figure 1: représentation du modèle de domaine associé au niveau racine du modèle des buts fonctionnels décrit dans [2]</i>	6
<i>Figure 2: représentation du modèle de domaine associé au premier niveau de raffinement du modèle des buts fonctionnels décrit dans [2]</i>	9
<i>Figure 3: représentation du modèle de domaine associé au deuxième niveau de raffinement du modèle des buts fonctionnels décrit dans [2]</i>	12
<i>Figure 4: représentation du modèle de domaine associé au troisième niveau de raffinement du modèle des buts fonctionnels décrit dans [2]</i>	18
<i>Figure 5: représentation du modèle de domaine associé au quatrième niveau de raffinement du modèle des buts fonctionnels décrit dans [2]</i>	21
<i>Figure 6: représentation du modèle de domaine associé au cinquième niveau de raffinement du modèle des buts fonctionnels décrit dans [2]</i>	25

I- Description de la méthodologie

SysML/KAOS est une méthode formelle d'ingénierie des exigences développée dans le cadre du projet FORMOSE (ANR-14-CE28-0009). Elle définit [1] :

- Un langage permettant de capturer les exigences fonctionnelles (ce qui doit être réalisé) et non fonctionnelles (contraintes de réalisation : sécurité, efficacité, temporalité, etc.) d'un système sous forme de hiérarchies de buts.
- Un langage permettant de capturer les entités et les propriétés du domaine d'application du système.
- Des règles permettant de générer une spécification formelle à partir des modèles de buts et de domaine.
- Des règles permettant de propager les résultats/observations issus des activités de vérification et de validation formelle vers les modèles SysML/KAOS correspondants.

II- Modélisation du domaine

Modéliser le domaine d'un système revient à définir les entités qui le constituent ainsi que leurs relations et leurs contraintes. Le langage de modélisation de domaine utilisé dans le cadre de la méthodologie SysML/KAOS est décrit et illustré dans [1]. Chaque modèle de domaine SysML/KAOS est associé à un niveau d'abstraction du modèle des buts fonctionnels [2] et définit les concepts, associations et individus pertinents pour la satisfaction des buts. Ces définitions sont accompagnées de contraintes, exprimées en utilisant la théorie des ensembles et la logique des prédicats, permettant de matérialiser ce qui est autorisé et ce qui ne l'est pas relativement aux entités du modèle.

1- Niveau racine

Ce niveau introduit les entités permettant de représenter l'état réel du tunnel et de définir la position réelle des véhicules.

a) Identification des entités du domaine

Identification de l'entité	Contraintes	Description
<i>VEHICLE</i>		Concept abstrait représentant l'ensemble des véhicules susceptibles d'emprunter la sortie du tunnel.
<i>Vehicle</i>	$Concept_isVariable(Vehicle) = TRUE$	Sous ensemble variable de <i>VEHICLE</i> représentant l'ensemble des véhicules actuellement présents à la sortie du tunnel. Le cardinal de cet ensemble peut permettre de quantifier l'état de la congestion.
	$Vehicle \subseteq VEHICLE$	
<i>TUNNEL_</i> <i>TRAVEL_LANE</i>	$TUNNEL_TRAVEL_LANE = \{TRAVEL_LANE_I, TRAVEL_LANE_II\}$	Ensemble définissant les voies de circulation : <i>TRAVEL_LANE_I</i> désigne la voie de circulation principale et <i>TRAVEL_LANE_II</i> désigne la voie de circulation secondaire qui apparaît au niveau de la portion du tunnel qui rencontre la rue Nazareth.
<i>Tunnel</i> , <i>Tunnel_part1</i> , <i>Tunnel_part2</i>	$aa \in \mathbb{N}, bb \in \mathbb{N}, cc \in \mathbb{N}$	Le concept <i>Tunnel</i> représente la portion de voie correspondant à la sortie du tunnel Ville-Marie. Cette sortie débute par une portion à une voie représentée par <i>Tunnel_part1</i> et s'achève au croisement avec la rue William par une portion à deux voies représentée par <i>Tunnel_part2</i> .
	$aa < bb, bb < cc$	
	$Tunnel_part1 = aa..bb, Tunnel_part2 = bb..cc$	
	$Tunnel = Tunnel_part1 \cup Tunnel_part2$	
<i>Vehicle_</i> <i>Travel_Lane</i>	$Concept_isVariable(Vehicle_Travel_Lane) = TRUE$	Concept variable permettant d'associer chaque véhicule localisé à la sortie du tunnel à la voie de circulation qu'il emprunte.
	$Vehicle_Travel_Lane \in Vehicle \rightarrow TUNNEL_TRAVEL_LANE$	
<i>Vehicle_Length</i>	$Vehicle_Length \in VEHICLE \rightarrow \mathbb{N}$	Concept définissant la longueur de chaque véhicule.
<i>Vehicle_</i> <i>Front_Position</i>	$Concept_isVariable(Vehicle_Front_Position) = TRUE$	Concept variable permettant d'associer une localisation à l'avant de chaque véhicule présent à la sortie du tunnel.
	$Vehicle_Front_Position \in Vehicle \rightarrow Tunnel$	
	$\forall (xx). (xx \in Vehicle \wedge Vehicle_Front_Position(xx) \in Tunnel_part1 \Rightarrow Vehicle_Travel_Lane(xx) = TRAVEL_LANE_I)$	Un véhicule dont l'avant est localisé sur <i>Tunnel_part1</i> ne peut emprunter que la voie de circulation principale (<i>TRAVEL_LANE_I</i>). Un invariant de sûreté contraint la localisation du véhicule.

	$\forall (xx1, xx2). ((xx1 \in Vehicle \wedge xx2 \in Vehicle \wedge xx1 \neq xx2) \Rightarrow ((Vehicle_Front_Position(xx1) - Vehicle_Length(xx1)) \dots Vehicle_Front_Position(xx1) \cap (Vehicle_Front_Position(xx2) - Vehicle_Length(xx2)) \dots Vehicle_Front_Position(xx2) = \emptyset \vee Vehicle_Travel_Lane(xx1) \neq Vehicle_Travel_Lane(xx2)))$	Les portions de voies occupées par deux véhicules doivent être distinctes : ceci garantit l'absence de collisions. L'hypothèse sous-jacente est que tous les véhicules se déplacent dans le même sens.
<i>Visibility_Limit</i>	$Visibility_Limit \in Tunnel_part1 \rightarrow Tunnel$	Concept permettant d'associer une limite de visibilité, liée à la courbure du tunnel, à chaque portion de <i>Tunnel_part1</i> : chaque usager dont l'avant du véhicule <i>A</i> est localisé à $xx \in Tunnel$ est supposé être capable de voir le véhicule <i>B</i> devant lui (et par conséquent agir de façon à éviter une collision) sauf si $xx \in dom(Visibility_Limit)$ et que l'arrière du véhicule <i>B</i> est situé au-delà de $Visibility_Limit(xx)$. Il est à noter que la portion <i>Tunnel_part2</i> du tunnel ne présente aucune courbure.
	$\forall (xx). (xx \in dom(Visibility_Limit) \Rightarrow Visibility_Limit(xx) > xx)$	La limite de visibilité en un point xx se situe toujours à l'avant de xx .
<i>Speed_Limit</i>	$Concept_isVariable(Speed_Limit) = TRUE$	Concept permettant d'associer une vitesse limite (exprimée en KM/H) à chaque élément de <i>Tunnel</i> . Cette vitesse limite est susceptible d'être mise à jour suivant l'état de la congestion.
	$Speed_Limit \in Tunnel \rightarrow \mathbb{N}$	
<i>Min_Brake_Distance</i>	$Concept_isVariable(Min_Brake_Distance) = TRUE$	Concept permettant d'associer une distance minimale de freinage à chaque vitesse définie comme vitesse limite à un point du tunnel. Ce concept est variable parce qu'il est possible de mettre à jour la limite de vitesse associée à un point du tunnel.
	$Min_Brake_Distance \in ran(Speed_Limit) \rightarrow \mathbb{N}$	
	$\forall xx. (xx \in dom(Visibility_Limit) \Rightarrow Visibility_Limit(xx) - xx \geq Min_Brake_Distance(Speed_Limit(xx)))$	Pour chaque limite de vitesse définie pour un point $xx \in Tunnel$, il est nécessaire de garantir que si une limite de visibilité est applicable à ce point, la vitesse limite doit être définie de telle sorte que la distance minimale de freinage soit inférieure à la distance entre xx et $Visibility_Limit(xx)$.

b) Illustration

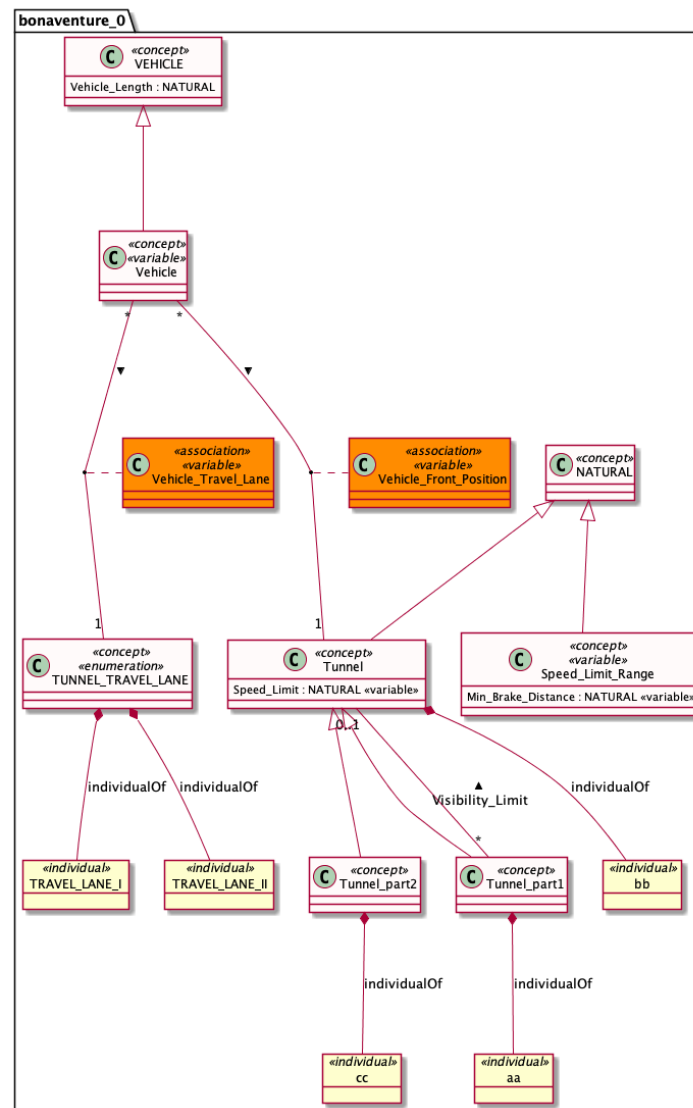


Figure 1: représentation du modèle de domaine associé au niveau racine du modèle des buts fonctionnels décrit dans [2]

2- Premier niveau de raffinement

Ce niveau introduit les entités permettant de représenter l'état réel du trafic à la sortie du tunnel en fonction de la vitesse et de la position réelle de chaque véhicule.

a) Identification des entités du domaine

Identification de l'entité	Contraintes	Description
<i>MAXIMAL_TUNNEL_OCCUPATION</i>	$MAXIMAL_TUNNEL_OCCUPATION \in \mathbb{N}$	Constante représentant le nombre maximal de véhicules autorisés à la sortie du tunnel.
<i>Vehicle_Speed</i>	$Concept_isVariable(Vehicle_Speed) = TRUE$	Concept variable permettant d'associer une vitesse exprimée en KM/H à chaque véhicule présent à la sortie du tunnel.
	$Vehicle_Speed \in Vehicle \rightarrow \mathbb{N}$	
	$\forall (xx). (xx \in Vehicle \Rightarrow Vehicle_Speed(xx) \leq Speed_Limit(Vehicle_Front_Position(xx)))$	Nous faisons l'hypothèse que l'utilisateur respecte la signalisation routière, ce qui se traduit par le fait que la vitesse de tout véhicule doit toujours être inférieure à la vitesse limite associée à la portion du tunnel qu'occupe son avant.
<i>TRAFFIC_LEVEL</i>	$TRAFFIC_LEVEL = \{NORMAL, DENSE, SLOWED, CONGESTION\}$	Énumération représentant l'ensemble des niveaux de trafic admissibles [3].
<i>traffic_level</i>	$Individual_isVariable(traffic_level) = TRUE$	Variable représentant le niveau courant du trafic à la sortie du tunnel. À l'initialisation, nous supposons que le trafic est normal.
	$traffic_level \in TRAFFIC_LEVEL$	
	$initialValue(traffic_level) = NORMAL$	
	$traffic_level = NORMAL \Rightarrow \left(\frac{card(Vehicle) * 100}{MAXIMAL_TUNNEL_OCCUPATION} \right) < 40 \wedge (\forall (xx). (xx \in Vehicle \Rightarrow Vehicle_Speed(xx) \geq 40))$	La définition des niveaux de trafic est extraite de [3], avec l'hypothèse que « moins 40% » correspond à « < 40% » et que « plus de 40% » correspond à « > 40% ».

	$\text{traffic_level} = DENSE \Rightarrow \left(\frac{\text{card}(\text{Vehicle}) * 100}{\text{MAXIMAL_TUNNEL_OCCUPATION}} \right)$ $< 40 \wedge (\forall(xx). (xx \in \text{Vehicle} \Rightarrow \text{Vehicle_Speed}(xx) \in 35..39)))$	
	$\text{traffic_level} = SLOWED \Rightarrow \left(\frac{\text{card}(\text{Vehicle}) * 100}{\text{MAXIMAL_TUNNEL_OCCUPATION}} \right)$ $> 40 \wedge (\forall(xx). (xx \in \text{Vehicle} \Rightarrow \text{Vehicle_Speed}(xx) \in 25..34)))$	
	$\text{traffic_level} = CONGESTION \Rightarrow \left(\frac{\text{card}(\text{Vehicle}) * 100}{\text{MAXIMAL_TUNNEL_OCCUPATION}} \right)$ $> 40 \wedge (\forall(xx). (xx \in \text{Vehicle} \Rightarrow \text{Vehicle_Speed}(xx) < 15)))$	

b) Illustration

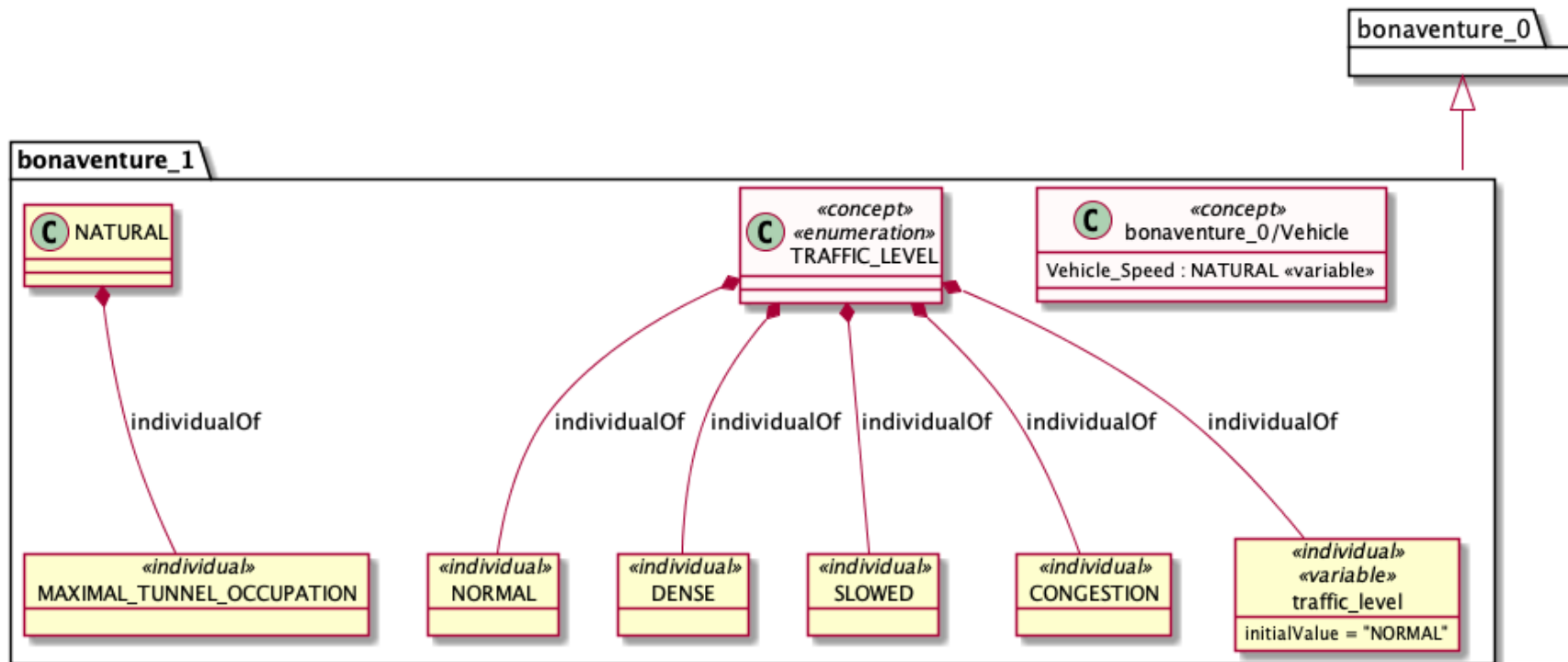


Figure 2: représentation du modèle de domaine associé au premier niveau de raffinement du modèle des buts fonctionnels décrit dans [2]

3- Deuxième niveau de raffinement

Ce niveau de raffinement introduit la distinction entre ce qui est observé (vue du système) et ce qui est réel (vue de l'environnement). Les entités précédemment définies restent et représentent la vue de l'environnement.

a) Identification des entités du domaine

Identification de l'entité	Contraintes	Description
Observed_Vehicle	$Concept_isVariable(Observed_Vehicle) = TRUE$	Sous ensemble variable de <i>Vehicle</i> représentant l'ensemble des véhicules observés à la sortie du tunnel par le système (grâce à ses capteurs).
	$Observed_Vehicle \subseteq Vehicle$	
Observed_Vehicle_Travel_Lane	$Concept_isVariable(Observed_Vehicle_Travel_Lane) = TRUE$	Concept variable permettant de représenter la voie de circulation empruntée par chaque véhicule observé par le système.
	$Observed_Vehicle_Travel_Lane \in Observed_Vehicle \rightarrow TUNNEL_TRAVEL_LANE$	
Observed_Vehicle_Front_Position	$Concept_isVariable(Observed_Vehicle_Front_Position) = TRUE$	Concept variable permettant de représenter la portion du tunnel où le système observe l'avant de chaque véhicule.
	$Observed_Vehicle_Front_Position \in Observed_Vehicle \rightarrow Tunnel$	
	$\forall (xx). (xx \in Observed_Vehicle \wedge Observed_Vehicle_Front_Position(xx) \in Tunnel_part1 \Rightarrow Observed_Vehicle_Travel_Lane(xx) = TRAVEL_LANE_I)$	Un véhicule dont l'avant est observé sur <i>Tunnel_part1</i> ne peut emprunter que la voie de circulation principale (<i>TRAVEL_LANE_I</i>).
	$\forall (xx1, xx2). ((xx1 \in Observed_Vehicle \wedge xx2 \in Observed_Vehicle \wedge xx1 \neq xx2) \Rightarrow ((Observed_Vehicle_Front_Position(xx1) - Vehicle_Length(xx1)) \dots Observed_Vehicle_Front_Position(xx1) \cap (Observed_Vehicle_Front_Position(xx2) - Vehicle_Length(xx2)) \dots Observed_Vehicle_Front_Position(xx2) = \emptyset \vee Observed_Vehicle_Travel_Lane(xx1) \neq Observed_Vehicle_Travel_Lane(xx2)))$	La contrainte de non collision doit également être garantie.
Observed_Vehicle_Speed	$Concept_isVariable(Observed_Vehicle_Speed) = TRUE$	Vitesse observée pour les véhicules dont le système a connaissance grâce à ses capteurs.
	$Observed_Vehicle_Speed \in Observed_Vehicle \rightarrow \mathbb{N}$	

	$\forall (xx). (xx \in \text{Observed_Vehicle} \Rightarrow \text{Observed_Vehicle_Speed}(xx) \leq \text{Speed_Limit}(\text{Observed_Vehicle_Front_Position}(xx)))$	Cette vitesse doit également rester inférieure à la vitesse limite associée à la portion du tunnel où l'avant du véhicule est observé.
<i>observed_traffic_level</i>	<i>Individual_isVariable</i> (observed_traffic_level) = <i>TRUE</i>	Variable représentant le niveau de trafic à la sortie du tunnel tel qu'estimé par le système à partir de ses observations : vitesse et positionnement des véhicules détectés par les capteurs. À l'initialisation, nous supposons également que le trafic observé est normal.
	observed_traffic_level ∈ TRAFFIC_LEVEL	
	<i>initialValue</i> (observed_traffic_level) = <i>NORMAL</i>	
	$\text{observed_traffic_level} = \text{NORMAL} \Rightarrow \left(\frac{\text{card}(\text{Observed_Vehicle}) * 100}{\text{MAXIMAL_TUNNEL_OCCUPATION}} \right) < 40 \wedge (\forall (xx). (xx \in \text{Observed_Vehicle} \Rightarrow \text{Observed_Vehicle_Speed}(xx) \geq 40)))$	
	$\text{observed_traffic_level} = \text{DENSE} \Rightarrow \left(\frac{\text{card}(\text{Observed_Vehicle}) * 100}{\text{MAXIMAL_TUNNEL_OCCUPATION}} \right) < 40 \wedge (\forall (xx). (xx \in \text{Observed_Vehicle} \Rightarrow \text{Observed_Vehicle_Speed}(xx) \in 35..39)))$	
	$\text{observed_traffic_level} = \text{SLOWED} \Rightarrow \left(\frac{\text{card}(\text{Observed_Vehicle}) * 100}{\text{MAXIMAL_TUNNEL_OCCUPATION}} \right) > 40 \wedge (\forall (xx). (xx \in \text{Observed_Vehicle} \Rightarrow \text{Observed_Vehicle_Speed}(xx) \in 25..34)))$	
	$\text{observed_traffic_level} = \text{CONGESTION} \Rightarrow \left(\frac{\text{card}(\text{Observed_Vehicle}) * 100}{\text{MAXIMAL_TUNNEL_OCCUPATION}} \right) > 40 \wedge (\forall (xx). (xx \in \text{Observed_Vehicle} \Rightarrow \text{Observed_Vehicle_Speed}(xx) < 15)))$	Les contraintes relatives aux niveaux de trafic restent les mêmes que pour la vue de l'environnement [3].

b) Illustration

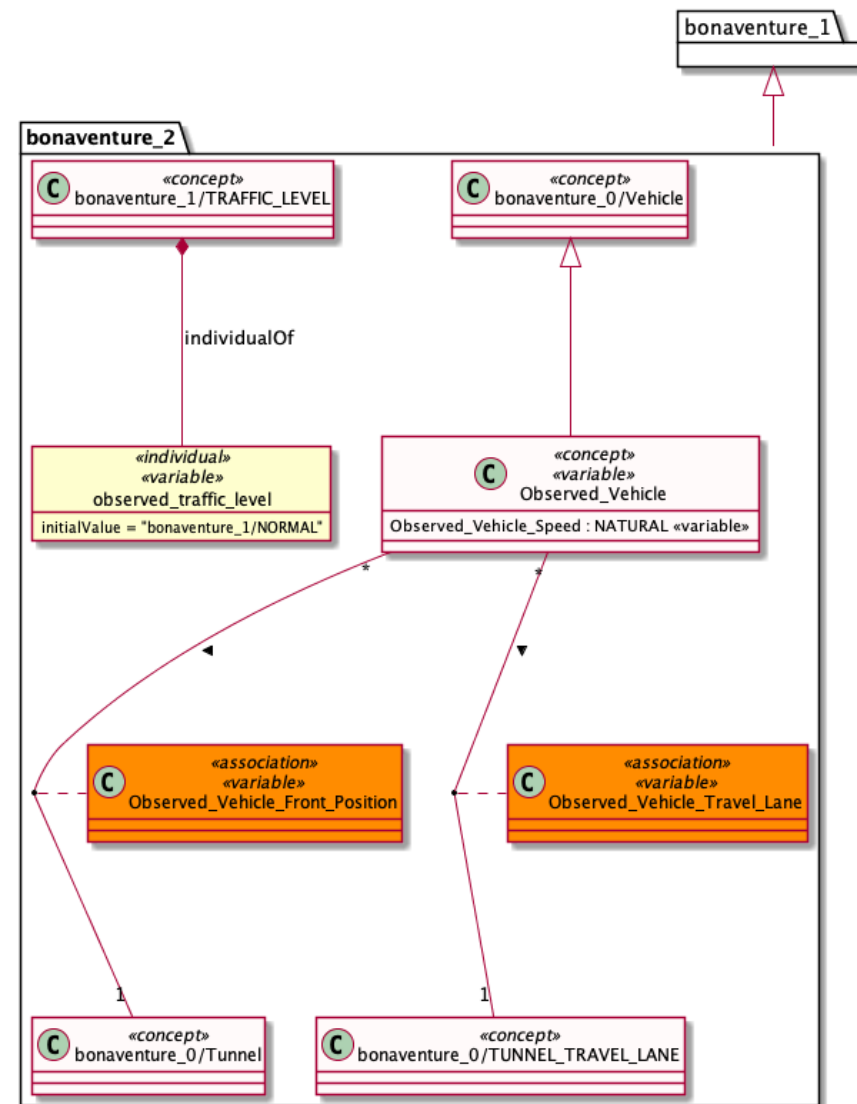


Figure 3: représentation du modèle de domaine associé au deuxième niveau de raffinement du modèle des buts fonctionnels décrit dans [2]

4- Troisième niveau de raffinement

Ce niveau de raffinement introduit les capteurs permettant d'estimer le niveau de trafic et les modes de supervision (normal et dégradés). Il introduit également la notion de plan de feux afin de tenir compte de sa régulation par le contrôleur de plan de feux. **Question : l'AID fournit directement une estimation du niveau de trafic. Qu'en est-il de la caméra et du radar de la VdM ? Quelles détections sont fournies par ces capteurs et comment sont-elles combinées afin d'aboutir à une estimation du niveau de trafic ?**

Réponse : il est possible d'estimer l'état du trafic autant à partir des données fournies par la caméra thermique (longueur de file d'attente) que par celles fournies par le radar (plusieurs statistiques à l'exemple de la vitesse des véhicules). Toutefois, les données fournies par le radar sont exploitées en priorité et, en ce qui concerne le point le plus critique de la courbure du tunnel, les données fournies par la caméra sont exploitées afin de confronter les détections.

a) Identification des entités du domaine

Identification de l'entité	Contraintes	Description
<i>Sensor</i>		Concept abstrait représentant l'ensemble des capteurs susceptibles d'être utilisés pour la détection du niveau de trafic à la sortie du tunnel.
<i>VdM_Sensor</i>	$VdM_Sensor \subseteq Sensor$	Sous concept de <i>Sensor</i> modélisant l'ensemble des capteurs appartenant à la VdM (Ville de Montréal).
<i>MtQ_Sensor</i>	$MtQ_Sensor \subseteq Sensor$	Sous concept de <i>Sensor</i> modélisant l'ensemble des capteurs appartenant au MTQ (Ministère des Transports du Québec).
<i>AID</i>	$AID \in MtQ_Sensor$	Individu de <i>MtQ_Sensor</i> modélisant l'AID (Automatic Incident Detector) du MTQ.
<i>OPERATING_MODE</i>	$OPERATING_MODE = \{NORMAL_MODE, DEGRADED_MODE_I, DEGRADED_MODE_II\}$	Énumération définissant les modes de fonctionnement possible : <i>NORMAL_MODE</i> pour le mode de fonctionnement normal et <i>DEGRADED_MODE_I</i> et <i>DEGRADED_MODE_II</i> pour les modes de fonctionnement dégradés.
<i>operating_mode</i>	$Individual_isVariable(operating_mode) = TRUE$ $operating_mode \in OPERATING_MODE$	Variable représentant le mode de fonctionnement courant. À l'initialisation, nous supposons qu'il s'agit du mode normal.
<i>Traffic_Light</i>	$Traffic_Light_William \in Traffic_Light$ $Traffic_Light_Wellington \in Traffic_Light$	Concept représentant les feux de signalisation dont le fonctionnement est influencé par la régulation du trafic à la sortie du tunnel Ville-

		Marie. Il s'agit par exemple du feu au croisement des rues Nazareth et William (<i>Traffic_Light_William</i>).
<i>COLOR</i>	$COLOR = \{RED, GREEN, ORANGE\}$	Énumération définissant les colorations possibles des feux de signalisation.
<i>tsc_observed_traffic_level</i>	$Individual_isVariable(tsc_observed_traffic_level) = TRUE$	Variable représentant le niveau de trafic à la sortie du tunnel, tel qu'observé par l'automate en charge de la régulation du trafic, à partir des détections des capteurs de la VdM. À l'initialisation, nous supposons que le trafic observé est normal.
	$tsc_observed_traffic_level \in TRAFFIC_LEVEL$	
	$initialValue(tsc_observed_traffic_level) = NORMAL$	
<i>Traffic_Light_Position</i>	$Traffic_Light_Position \in Traffic_Light \rightarrow Tunnel$	Concept permettant d'associer une localisation à chaque panneau de feu de signalisation.
<i>Traffic_Light_Coverage_Rear</i>	$Traffic_Light_Coverage_Rear \in Traffic_Light \rightarrow Tunnel$	Concept permettant de définir la limite arrière de la zone de visibilité d'un panneau de feu de signalisation.
<i>Traffic_Signal_Program</i>	$Concept_isVariable(Traffic_Signal_Program) = TRUE$	Concept variable permettant de représenter le plan de feux défini pour la régulation du trafic à la sortie du tunnel. Ce plan de feux définit la durée d'observation des couleurs pour chaque feu de signalisation.
	$Traffic_Signal_Program \in (Traffic_Light * COLOR) \rightarrow NATURAL$	
<i>Sensor_Observed_Traffic_Level</i>	$Concept_isVariable(Sensor_Observed_Traffic_Level) = TRUE$	Concept variable représentant les estimations de niveau de trafic effectués (ou déterminés à partir des données reportées) par les différents capteurs.
	$Sensor_Observed_Traffic_Level \in Sensor \rightarrow TRAFFIC_LEVEL$	
	$operating_mode = NORMAL_MODE$ $\Rightarrow observed_traffic_level$ $= Sensor_Observed_Traffic_Level (AID)$	Lorsque la régulation de trafic s'effectue en mode normal, l'état du trafic considéré par le système provient des détections réalisées par l'AID.
	$operating_mode \in \{DEGRADED_MODE_I, DEGRADED_MODE_II\}$ $\Rightarrow observed_traffic_level$ $\in Sensor_Observed_Traffic_Level [VdM_Sensor]$	Lorsque la régulation de trafic s'effectue en mode dégradé, l'état du trafic considéré par le système provient des détections réalisées par les capteurs de la VdM (en priorité le radar (4 lieux) ; la caméra, en cas de faute, pour le 4 ^e lieu (point le plus dangereux de la longueur de file d'attente)).
<i>Sensor_Observed_Vehicle</i>	$Concept_isVariable(Sensor_Observed_Vehicle) = TRUE$	Concept variable permettant d'associer les véhicules observés par le système aux capteurs grâce auxquels ils sont détectés.
	$Sensor_Observed_Vehicle \in Sensor * Observed_Vehicle$	
	$\forall xx. (xx \in Observed_Vehicle \Rightarrow card(Sensor_Observed_Vehicle^{-1}[\{xx\}]) \geq 1)$	

<i>Sensor_Coverage_Rear</i>	$Sensor_Coverage_Rear \in Sensor \rightarrow Tunnel$	Concept permettant de définir la limite arrière de la zone de couverture d'un capteur.
	$Sensor_Coverage_Rear(AID) = aa$	La limite arrière de la zone de couverture de l'AID est l'extrémité arrière du tunnel.
	$\forall (xx, yy). (xx \in dom(Sensor_Observed_Traffic_Level) \wedge yy \in Sensor_Observed_Vehicle [\{xx\}]) \Rightarrow Vehicle_Rear_Position(yy) \dots Vehicle_Front_Position(yy) \cap Sensor_Coverage_Rear(xx) \dots Sensor_Coverage_Front(xx) \neq \emptyset$	Le capteur est supposé n'être capable d'observer que les véhicules présents dans sa zone de couverture.
<i>Sensor_Position</i>	$Sensor_Position \in Sensor \rightarrow Tunnel$	Concept permettant d'associer une localisation à chaque capteur.
	$Sensor_Position(AID) = cc$	L'AID est supposé être localisé exactement à l'extrémité avant du tunnel.
<i>Sensor_Coverage_Front</i>	$Sensor_Coverage_Front \in Sensor \rightarrow Tunnel$	Concept permettant de définir la limite avant de la zone de couverture d'un capteur.
	$Sensor_Coverage_Front(AID) = cc$	La limite avant de la zone de couverture de l'AID est l'extrémité avant du tunnel.
<i>Sensor_Detection_Accuracy</i>	$Sensor_Detection_Accuracy \in Sensor \rightarrow NATURAL$	Concept permettant de quantifier le degré de précision des détections réalisées par un capteur.
	$Sensor_Detection_Accuracy(AID) = 1$	La précision de l'AID est de l'ordre de l'unité de mesure des distances.
	$\forall (xx). (xx \in VdM_Sensor \Rightarrow Sensor_Detection_Accuracy(xx) \geq Sensor_Detection_Accuracy(AID))$	La précision des détections réalisées par l'AID du MTQ est toujours supérieure à celle des détections réalisées par les capteurs de la VdM.
<i>Is_Sensor_Detection_Available</i>	$Concept_isVariable(Is_Sensor_Detection_Available) = TRUE$	Sachant que les détections réalisées par certains capteurs peuvent être disponibles ou pas au moment de réaliser la régulation de trafic, ce concept variable permet de matérialiser cette disponibilité et associe à chaque capteur un flag permettant de savoir si oui ou non ses détections seront disponibles lors du prochain cycle de régulation de trafic.
	$Is_Sensor_Detection_Available \in Sensor \rightarrow BOOL$	

	$\begin{aligned} & operating_mode = NORMAL_MODE \\ & \Rightarrow Is_Sensor_Detection_Available(AID) \\ & = TRUE \end{aligned}$	Les détections de l'AID sont toujours disponibles lorsque la régulation de trafic s'effectue en mode normal.
	$\begin{aligned} & operating_mode \\ & \in \{ DEGRADED_MODE_I, DEGRADED_MODE_II \} \\ & \Rightarrow Is_Sensor_Detection_Available(AID) \\ & = FALSE \end{aligned}$	Les détections de l'AID ne sont pas disponibles lorsque la régulation de trafic s'effectue en mode dégradé.
<i>Sensor_Observed_Vehicle_Speed</i>	$Concept_isVariable(Sensor_Observed_Vehicle_Speed) = TRUE$	Concept variable permettant d'associer à chaque véhicule observé l'estimation de vitesse faite par chaque capteur qui le détecte ¹ .
	$\begin{aligned} & Sensor_Observed_Vehicle_Speed \in Sensor_Observed_Vehicle \\ & \rightarrow NATURAL \end{aligned}$	
	$\begin{aligned} & \forall xx. (xx \\ & \in dom(Sensor_Observed_Traffic_Level) \\ & \wedge Sensor_Observed_Traffic_Level(xx) = NORMAL \\ & \Rightarrow \left(\frac{card(Sensor_Observed_Vehicle [\{ xx \}]) * 100}{MAXIMAL_TUNNEL_OCCUPATION} \right) \\ & < 40 \wedge (\forall (yy). (yy \in Sensor_Observed_Vehicle [\{ xx \}] \\ & \Rightarrow Sensor_Observed_Vehicle_Speed(xx \mid \rightarrow yy) \geq 40))) \end{aligned}$	Les contraintes relatives aux niveaux de trafic associés aux détections réalisées par les différents capteurs restent les mêmes que pour la vue de l'environnement [3].
	$\begin{aligned} & \forall xx. (xx \\ & \in dom(Sensor_Observed_Traffic_Level) \\ & \wedge Sensor_Observed_Traffic_Level(xx) = DENSE \\ & \Rightarrow \left(\frac{card(Sensor_Observed_Vehicle [\{ xx \}]) * 100}{MAXIMAL_TUNNEL_OCCUPATION} \right) \\ & < 40 \wedge (\forall (yy). (yy \in Sensor_Observed_Vehicle [\{ xx \}] \\ & \Rightarrow Sensor_Observed_Vehicle_Speed(xx \mid \rightarrow yy) \in 35..39))) \end{aligned}$	

¹ La définition de cette association est possible grâce à la mise à jour du langage de modélisation de domaine, notamment la définition de l'association comme une spécialisation de la notion de concept.

	$\forall xx. (xx \in \text{dom}(\text{Sensor_Observed_Traffic_Level}) \wedge \text{Sensor_Observed_Traffic_Level}(xx) = \text{SLOWED} \Rightarrow \left(\frac{\text{card}(\text{Sensor_Observed_Vehicle} [\{xx\}]) * 100}{\text{MAXIMAL_TUNNEL_OCCUPATION}} \right) > 40 \wedge (\forall (yy). (yy \in \text{Sensor_Observed_Vehicle} [\{xx\}] \Rightarrow \text{Sensor_Observed_Vehicle_Speed}(xx \mapsto yy) \in 25 \dots 34))))$	
	$\forall xx. (xx \in \text{dom}(\text{Sensor_Observed_Traffic_Level}) \wedge \text{Sensor_Observed_Traffic_Level}(xx) = \text{CONGESTION} \Rightarrow \left(\frac{\text{card}(\text{Sensor_Observed_Vehicle} [\{xx\}]) * 100}{\text{MAXIMAL_TUNNEL_OCCUPATION}} \right) > 40 \wedge (\forall (yy). (yy \in \text{Sensor_Observed_Vehicle} [\{xx\}] \Rightarrow \text{Sensor_Observed_Vehicle_Speed}(xx \mapsto yy) < 15))))$	

b) Illustration

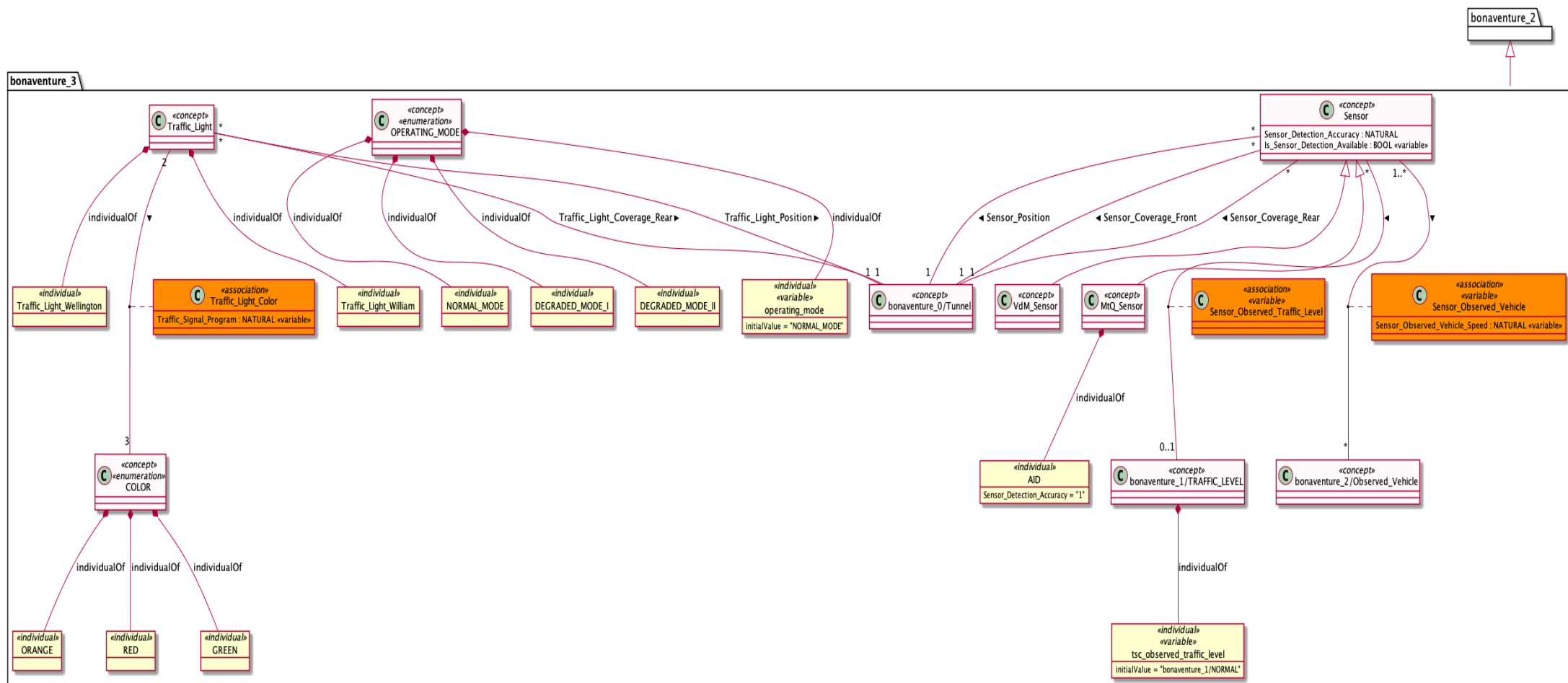


Figure 4: représentation du modèle de domaine associé au troisième niveau de raffinement du modèle des buts fonctionnels décrit dans [2]

5- Quatrième niveau de raffinement

Ce niveau de raffinement spécialise les capteurs de la VdM et introduit une première distinction entre l'état du trafic observé (vue des capteurs) et ce qui est reporté aux centres de contrôle à travers les canaux de communication.

a) Identification des entités du domaine

Identification de l'entité	Contraintes	Description
Traffic_Radar	$Traffic_Radar \in VdM_Sensor$	Radar de contrôle du trafic de la VdM.
	$Sensor_Position(Traffic_Radar) = cc$	Localisation du radar de trafic.
	$Sensor_Coverage_Front(Traffic_Radar) = cc$	Limite avant de la zone de couverture du radar de trafic.
	$Sensor_Coverage_Rear(Traffic_Radar) = aa$	Limite arrière de la zone de couverture du radar de trafic.
	$Sensor_Detection_Accuracy(Traffic_Radar) = (bb - aa)/4$	La précision d'une détection du radar est de l'ordre d'un quart de sa zone de couverture.
VdM_Sensor_Tunnel_Critical_Point	$VdM_Sensor_Tunnel_Critical_Point \subseteq VdM_Sensor$	Sous concept de VdM_Sensor modélisant l'ensemble des capteurs appartenant à la VdM et servant spécifiquement à estimer l'état du trafic dans la zone la plus dangereuse de la courbure du tunnel (caméra thermique, capteur souterrain). Le capteur retenu étant la caméra thermique.
	$Ground_Sensor \in VdM_Sensor_Tunnel_Critical_Point$	
	$Thermal_Camera \in VdM_Sensor_Tunnel_Critical_Point$	
	$ab \in Tunnel_part1$	Localisation de la caméra thermique.
	$Sensor_Position(Thermal_Camera) = ab$	
	$Sensor_Coverage_Front(Thermal_Camera) = ab$	Limite avant de la zone de couverture de la caméra thermique.
	$Sensor_Coverage_Rear(Thermal_Camera) = aa$	Limite arrière de la zone de couverture de la caméra thermique.

	$Sensor_Detection_Accuracy(Thermal_Camera)$ $= (bb - aa)/4$	La précision d'une détection de la caméra est la même que celle du radar.
<i>Sensor_ Communicated_ Traffic_Level</i>	$Concept_isVariable(Sensor_Communicated_Traffic_Level)$ $= TRUE$	Concept variable représentant les estimations de niveau de trafic communiquées par les différents capteurs aux centres de contrôle (CIGC /CGMU/ TrafficSignalController) à partir des observations.
	$Sensor_Communicated_Traffic_Level \in Sensor$ $\Rightarrow TRAFFIC_LEVEL$	
<i>Communi- cation_Channel</i>	$Concept_isVariable(Communication_Channel) = TRUE$	Concept variable représentant les canaux de communication permettant d'acheminer les observations réalisées par les capteurs aux centres de contrôle.
	$Communication_Channel \in Sensor_Observed_Traffic_Level$ $\rightsquigarrow Sensor_Communicated_Traffic_Level$	

b) Illustration

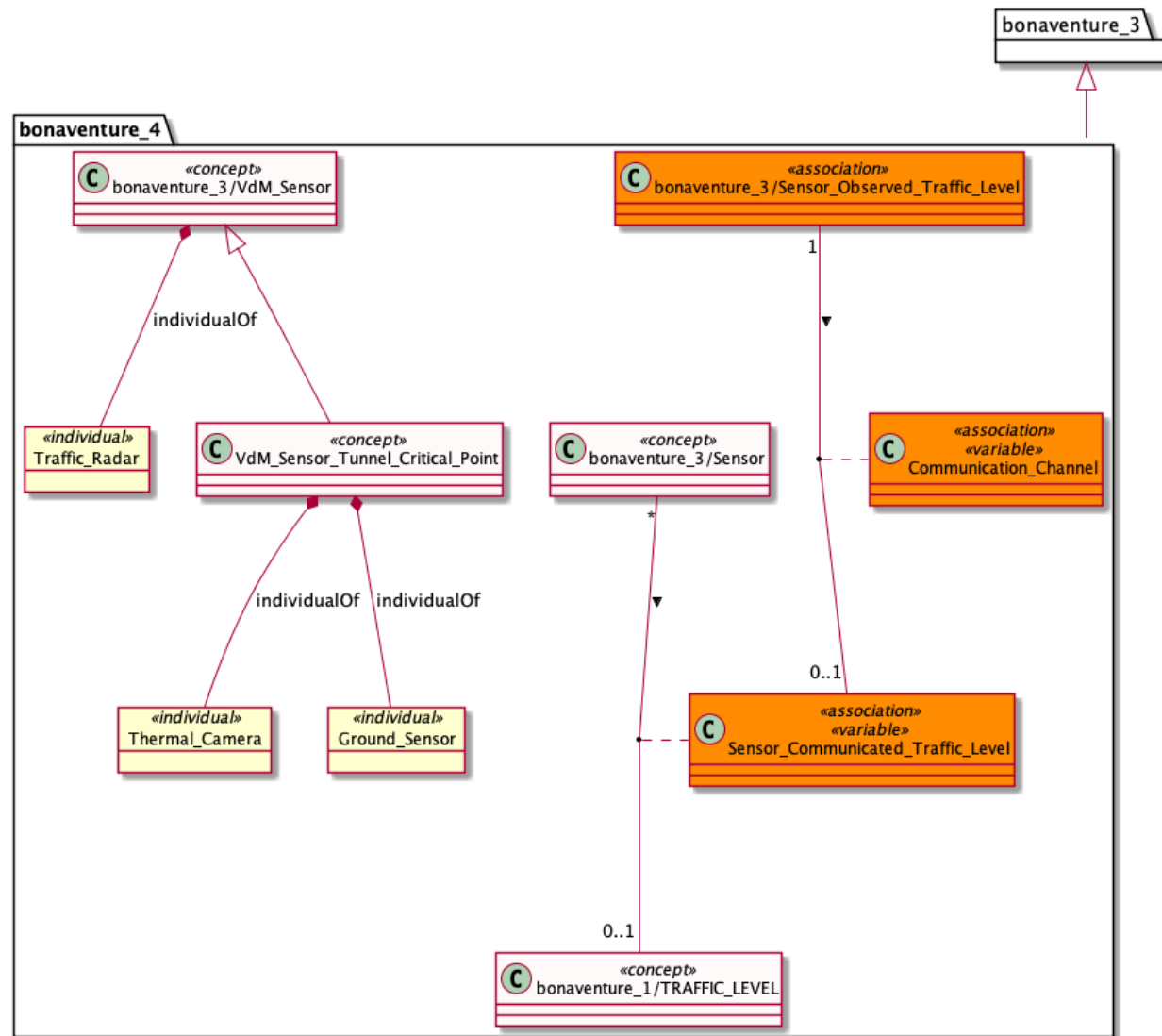


Figure 5: représentation du modèle de domaine associé au quatrième niveau de raffinement du modèle des buts fonctionnels décrit dans [2]

6- Cinquième niveau de raffinement

Ce niveau de raffinement complète la distinction entre l'état du trafic observé (vue des capteurs) et ce qui est reporté aux centres de contrôle à travers les canaux de communication. Il introduit également une modélisation des notifications usagers.

Question : Est-il possible que vous nous fassiez parvenir un récapitulatif (ou un document de référence) précisant les plans de feux et les notifications à l'attention des usagers associés aux niveaux de trafic ? Par exemple, lorsque le trafic est dense, pendant combien de temps le feu reste rouge au croisement Nazareth/William ? Toujours dans ce cas, quelle notification est adressée pour affichage au PMV1 ?

a) Identification des entités du domaine

Identification de l'entité	Contraintes	Description
Notification_Device	$CIGC_PMV1 \in Notification_Device$	Concept représentant les périphériques servant à faire parvenir des notifications relatives à l'état du trafic aux usagers.
	$CIGC_PMV2 \in Notification_Device$	
Notification		Concept représentant les notifications susceptibles d'être adressées aux usagers.
is_cgmu_cigc_sync	$Individual_isVariable(is_cgmu_cigc_sync) = TRUE$	Variable booléenne dont l'état permet de déterminer si le CGMU a effectivement été en mesure de synchroniser l'état du trafic estimé par les capteurs de la VdM avec le CIGC.
	$is_cgmu_cigc_sync \in BOOL$	
is_cigc_cgmu_sync	$Individual_isVariable(is_cigc_cgmu_sync) = TRUE$	Variable booléenne dont l'état permet de déterminer si le CIGC a effectivement été en mesure de synchroniser l'état du trafic estimé par l'AID avec le CGMU.
	$is_cigc_cgmu_sync \in BOOL$	
User_Notification	$Concept_isVariable(User_Notification) = TRUE$	Concept variable associant à chaque périphérique d'affichage la notification à faire apparaître.
	$User_Notification \in Notification_Device \rightarrow Notification$	
VdM_Sensor_Observed_Traffic_Level	$Concept_isVariable(VdM_Sensor_Observed_Traffic_Level) = TRUE$	Sous concept variable de <i>Sensor_Observed_Traffic_Level</i> permettant de représenter l'état du trafic observé par les capteurs de la VdM.
	$VdM_Sensor_Observed_Traffic_Level \in VdM_Sensor$	
	$VdM_Sensor_Observed_Traffic_Level \subseteq Sensor_Observed_Traffic_Level$	

	$operating_mode = DEGRADED_MODE_II$ $\Rightarrow observed_traffic_level$ $\in VdM_Sensor_Observed_Traffic_Level [VdM_Sensor]$	Lorsque la régulation de trafic s'effectue en mode dégradé II, le système a un accès direct aux observations effectuées par les capteurs de la VdM et les considère pour la détermination du plan de feux adéquat.
<i>MtQ_Sensor_Observed_Traffic_Level</i>	$Concept_isVariable(MtQ_Sensor_Observed_Traffic_Level) = TRUE$	Sous concept variable de <i>Sensor_Observed_Traffic_Level</i> permettant de représenter l'état du trafic observé par les capteurs du MTQ.
	$MtQ_Sensor_Observed_Traffic_Level \in MtQ_Sensor$ $\Rightarrow TRAFFIC_LEVEL$	
	$MtQ_Sensor_Observed_Traffic_Level$ $\subseteq Sensor_Observed_Traffic_Level$	
<i>VdM_Sensor_Communicated_Traffic_Level</i>	$Concept_isVariable(VdM_Sensor_Communicated_Traffic_Level) = TRUE$	Sous concept variable de <i>Sensor_Communicated_Traffic_Level</i> permettant de représenter les estimations de niveau de trafic communiquées par les capteurs de la VdM au CGMU.
	$VdM_Sensor_Communicated_Traffic_Level \in VdM_Sensor$ $\Rightarrow TRAFFIC_LEVEL$	
	$VdM_Sensor_Communicated_Traffic_Level$ $\subseteq Sensor_Communicated_Traffic_Level$	
<i>MtQ_Sensor_Communicated_Traffic_Level</i>	$Concept_isVariable(MtQ_Sensor_Communicated_Traffic_Level) = TRUE$	Sous concept variable de <i>Sensor_Communicated_Traffic_Level</i> permettant de représenter les estimations de niveau de trafic communiquées par les capteurs du MTQ au CIGC.
	$MtQ_Sensor_Communicated_Traffic_Level \in MtQ_Sensor$ $\Rightarrow TRAFFIC_LEVEL$	
	$MtQ_Sensor_Communicated_Traffic_Level$ $\subseteq Sensor_Communicated_Traffic_Level$	
<i>MtQ_Sensor_CIGC_Communication_Channel</i>	$Concept_isVariable(MtQ_Sensor_CIGC_Communication_Channel) = TRUE$	Sous concept variable de <i>Communication_Channel</i> représentant le canal de communication permettant d'acheminer les observations réalisées par les capteurs du MTQ au CIGC.
	$MtQ_Sensor_CIGC_Communication_Channel$ $\in MtQ_Sensor_Observed_Traffic_Level$ $\Rightarrow MtQ_Sensor_Communicated_Traffic_Level$	
	$MtQ_Sensor_CIGC_Communication_Channel$ $\subseteq Communication_Channel$	
<i>VdM_Sensor_CGMU_</i>	$Concept_isVariable(VdM_Sensor_CGMU_Communication_Channel) = TRUE$	Sous concept variable de <i>Communication_Channel</i> représentant le canal de communication permettant

<i>Communication_Channel</i>	$\begin{aligned} & \text{VdM_Sensor_CGMU_Communication_Channel} \\ & \in \text{VdM_Sensor_Observed_Traffic_Level} \\ & \rightsquigarrow \text{VdM_Sensor_Communicated_Traffic_Level} \end{aligned}$	d'acheminer les observations réalisées par les capteurs de la VdM au CGMU.
	$\begin{aligned} & \text{VdM_Sensor_CGMU_Communication_Channel} \\ & \subseteq \text{Communication_Channel} \end{aligned}$	
	$\begin{aligned} & \text{operating_mode} = \text{DEGRADED_MODE_I} \\ & \Rightarrow \text{observed_traffic_level} \\ & \in (\text{VdM_Sensor_CGMU_Communication_Channel}[\text{VdM_Sensor_Observed_Traffic_Level}])[\text{VdM_Sensor}] \end{aligned}$	Lorsque la régulation de trafic s'effectue en mode dégradé I, l'état du trafic considéré par le système provient des détections communiquées par les capteurs de la VdM au CGMU.
<i>CGMU_CIGC_Synchronisation_Channel</i>	$\begin{aligned} & \text{Concept_isVariable}(\text{CGMU_CIGC_Synchronisation_Channel}) \\ & = \text{TRUE} \end{aligned}$	Sous concept variable de <i>Communication_Channel</i> représentant le canal de communication permettant au CGMU et au CIGC de synchroniser les observations reçues de leurs capteurs respectifs.
	$\begin{aligned} & \text{CGMU_CIGC_Synchronisation_Channel} \\ & \in \text{Sensor_Observed_Traffic_Level} \\ & \rightsquigarrow \text{Sensor_Communicated_Traffic_Level} \end{aligned}$	
	$\text{CGMU_CIGC_Synchronisation_Channel} \subseteq \text{Communication_Channel}$	
	$\begin{aligned} & (\text{is_cgmu_cigc_sync} = \text{TRUE} \wedge \text{is_cigc_cgmu_sync} = \text{TRUE}) \\ & \Rightarrow \text{CGMU_CIGC_Synchronisation_Channel} \\ & = \text{MtQ_Sensor_CIGC_Communication_Channel} \\ & \cup \text{VdM_Sensor_CGMU_Communication_Channel} \end{aligned}$	Une fois les synchronisations effectuées, le CGMU et le CIGC possèdent la réunion des observations reçues de leurs capteurs respectifs.
	$\begin{aligned} & \text{operating_mode} = \text{NORMAL_MODE} \\ & \Rightarrow \text{observed_traffic_level} \\ & = (\text{CGMU_CIGC_Synchronisation_Channel}[\text{MtQ_Sensor_Observed_Traffic_Level}]) (\text{AID}) \end{aligned}$	Lorsque la régulation de trafic s'effectue en mode normal, l'état du trafic considéré par le système provient des détections communiquées par l'AID au CIGC et transmises au CGMU à travers le canal de communication CGMU-CIGC.

b) Illustration

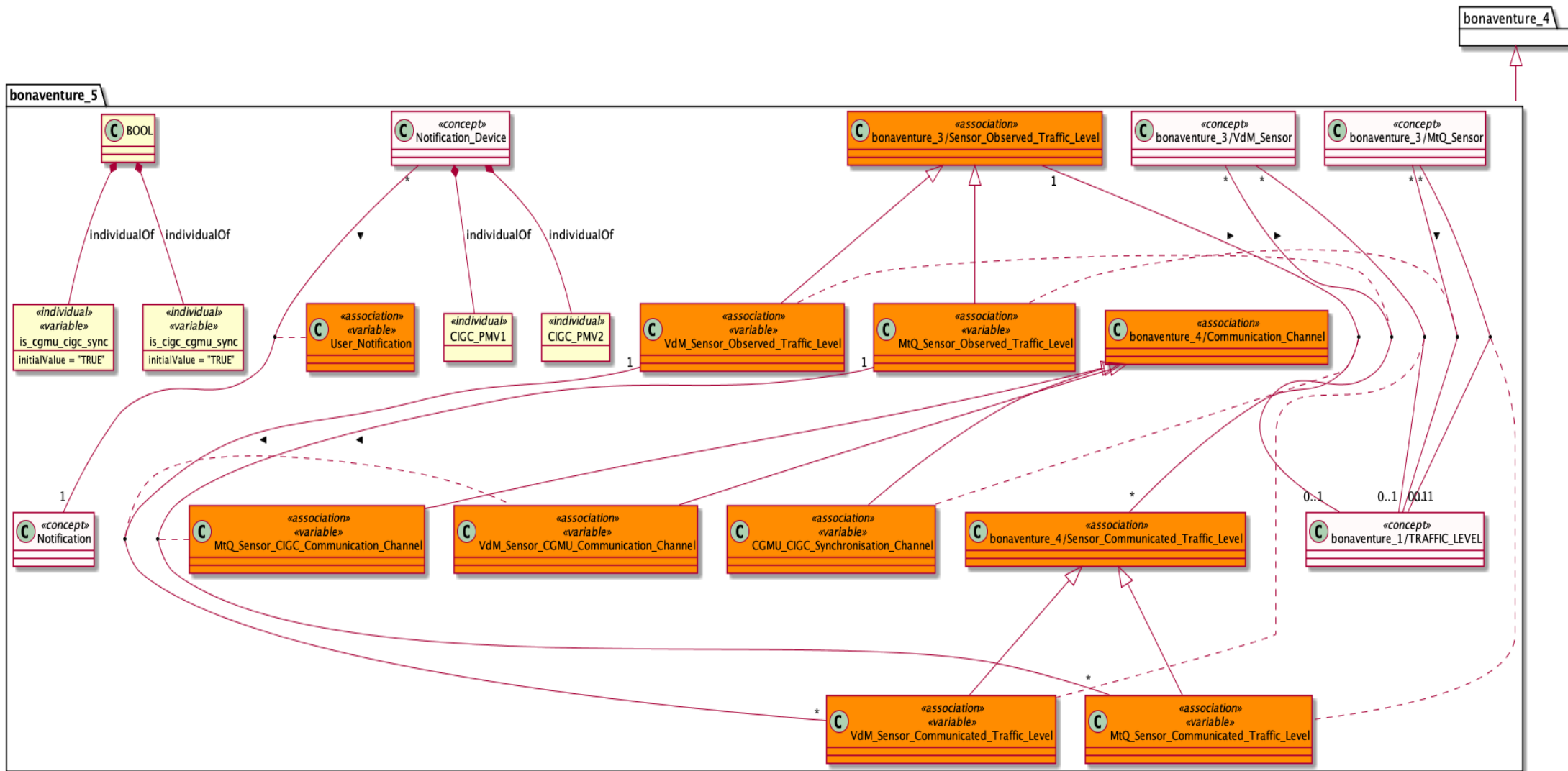


Figure 6: représentation du modèle de domaine associé au cinquième niveau de raffinement du modèle des buts fonctionnels décrit dans [2]

Références

- [1] S. J. Tueno Fotso, M. Frappier, R. Laleau et A. Mammar, «Modeling the hybrid ERTMS/ETCS level 3 standard using a formal requirements engineering approach,» *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 10817, n° 1 Abstract State Machines, Alloy, B, TLA, VDM, and Z - 6th International Conference, pp. 262-276, 2018.
- [2] S. J. Tueno Fotso, «Projet Bonaventure Livrable 1 : modèle des buts fonctionnels,» Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 2018.
- [3] Télécommunications GRIMARD, Entrepreneur spécialisé, «Système de détection d'évènement automatisé (DAI),» Laval, 2018.
- [4] S. J. T. FOTSO, «Compte rendu réunion de kick-off du projet Bonaventure,» Sherbrooke, 2018.
- [5] SMi, LES CONSULTANTS S.M. INC., «Raccordement des rues Duke et de Nazareth à l'autoroute Ville-Marie Avant-projet définitif,» Montréal, 2014.
- [6] SMi, LES CONSULTANTS S.M. INC., «Annexe 4 -(Rapport APD) – Raccordement des rues Duke et de Nazareth à l'autoroute Ville-Marie,» Montréal, 2015.
- [7] S. J. Tueno Fotso, «Compte rendu de la Séance de travail relative au projet Bonaventure du 26/09/2018,» Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 2018.