Théorie de méta-diagnostic : raisonnement sur les systèmes de diagnostic

Nuno Belard[1,2,3], Yannick Pencolé[2,3], Michel Combacau[2,3]

[1] Airbus France; 316 route de Bayonne; 31060 Toulouse, France
[2] LAAS-CNRS; 7 Avenue du Colonel Roche; F-31077 Toulouse, France
[3] Université de Toulouse; UPS, INSA, INP, ISAE; LAAS; 7 Avenue du Colonel Roche, F-31077 Toulouse, France
nuno.belard@airbus.com, ypencole@laas.fr, combacau@laas.fr

Résumé : Le principe du diagnostic à base de modèle est mis en œuvre à l'aide d'un algorithme qui, s'appuyant sur un modèle du système sous-jacent et de son observation, génère des hypothèses de diagnostic. Dans les applications réelles et contrairement aux hypothèses classiques, il se peut que ni le modèle, ni les observations, ni même l'algorithme implanté ne remplissent les pré-requis nécessaires à la bonne marche du système de diagnostic ; ce qui peut aboutir, le cas échéant, à de graves conséquences économiques. Le problème de méta-diagnostic consiste à déterminer les anomalies du système de diagnostic utilisé. Dans cet article, nous proposons dans un premier temps, une théorie générale du méta-diagnostic avec une sémantique clairement définie pour résoudre ce problème. Puis, nous établissons une liste des pré-requis au bon fonctionnement d'un système de diagnostic et leurs relations. Enfin, à l'aide du cadre théorique proposé, nous proposons et résolvons des exemples de problèmes de méta-diagnostic s'appuyant sur les pré-requis définis précédemment.

Mots-clés : Diagnostic à base de modèle, représentation des connaissances

1 Introduction

Le raisonnement diagnostique consiste à déterminer les composants normaux et anormaux d'un système réel. Dans le cadre du diagnostic à base de modèle (Reiter, 1987), (de Kleer & Williams, 1987), on dispose d'un algorithme générique produisant les diagnostics en s'appuyant sur une connaissance dite « profonde » du système et sur les observations disponibles. Dans cet article, ce modèle de connaissance est appelé « représentation du système » [1] et nous définissons un *système de diagnostic* par le triplet : *représentation du système*, *observations*, *algorithme de diagnostic*.

Sur des applications réelles, il n'est malheureusement pas rare de constater que les systèmes de diagnostic ne vérifient pas les prérequis usuels pour leur bon fonctionnement tel que, par exemple, l'utilisation d'une représentation correcte (c.-à-d. ontologiquement vraie) du système. Dans le cadre aéronautique, par exemple, cette garantie est nécessaire, sinon le système de diagnostic peut conduire à des opérations de maintenance incorrectes provoquant des délais non anticipés avec de sérieuses conséquences

1. Le mot « modèle » est, quant à lui, réservé à son usage classique dans le contexte de la théorie des modèles.

économiques. Néanmoins, disposer d'une représentation qui soit ontologiquement vraie n'est pas simple et c'est l'activité de nombreux ingénieurs de trouver des moyens d'en détecter et d'en corriger les anomalies.

Nous proposons d'appeler *méta-diagnostic* le problème de la détermination des anomalies dans un système de diagnostic. Notre première contribution, en section 3, est la définition d'une théorie logique de méta-diagnostic pour la résolution de ce type de problème. Cette théorie offre de nombreux avantages : elle dispose d'une sémantique clairement définie par la logique, c'est une théorie générale et unifiée afin de raisonner sur tout type de système de diagnostic. De plus, cette théorie de méta-diagnostic rend possible l'utilisation successive d'un ensemble de cas de tests (ensembles d'observations sur le système de diagnostic) afin de raffiner le méta-diagnostic. Cette possibilité de raffinement est particulièrement utile dans le cadre aéronautique où l'on dispose d'un ensemble important de cas de tests du système de diagnostic étudié ce qui permet une automatisation du processus d'isolation des anomalies dans le système de diagnostic.

La section 5 décrit la modélisation et la résolution de deux problèmes importants de méta-diagnostic. Ces problèmes de méta-diagnostic s'appuient sur des propriétés généralement requises pour le bon fonctionnement de système de diagnostic et qui sont présentées dans la section 4.

2 Rappels

Nous supposons ici que les bases de la théorie des modèles (structure, modèle et extensions) sont familières au lecteur (Hodges, 1993) ainsi que le cadre logique classique du diagnostic à base de modèle (Reiter, 1987)(de Kleer & Williams, 1987).

2.1 Système réel/représentation du système

Le diagnostic à base de modèle (DBM) est un problème de raisonnement dont le but est de déterminer les anomalies d'un système étant donnés sa description (souvent noté DS) et un ensemble d'observations OBS. L'hypothèse cruciale sur laquelle s'appuient les approches DBM est que le couple $(\mathsf{DS},\mathsf{OBS})$ représente *correctement* la réalité sous-jacente (c.-à-d. le système réel et les observations). Plus formellement, la réalité n'est représentable qu'à travers une structure, notons-la Ψ, d'informations brutes qui pourraient être accessibles (comportements et observations) si les capacités d'ingénierie et de calcul étaient illimitées. L'hypothèse des approches DBM sous-entend ainsi qu'il existe toujours une structure s disponible, modèle de $\mathsf{DS}\cup\mathsf{OBS}$ (c.-à-d. $\mathsf{s}\in\mathsf{Mod}(\mathsf{DS}\cup\mathsf{OBS})$), et qui peut être étendu à une structure t (c.-à-d. $\mathsf{s}\subseteq\mathsf{t}$) isomorphe à Ψ : $t \rightleftharpoons \Psi$. Utilisant les mots de Tarski (Tarski, 1936), les approches DBM s'appuient sur le fait que $\mathsf{DS}\cup\mathsf{OBS}$ est une théorie *ontologiquement vraie*, une théorie « *which says that the state of affairs is so and so, and the state of affairs is indeed so and so* ». Dans cet article, nous appelons *système réel* un ensemble R d'entités élémentaires (ou unités) communicantes et remplaçables (UCR), sur lesquelles s'effectue toute action de maintenance issue d'un diagnostic. La connaissance associée à R sera appelée *représentation du système*. Le système de diagnostic étant défini par l'utilisateur, la notion d'anomalie du système réel est donc lié à son point de vue :

Définition 1 (Anomalies d'une entité)
Une entité $c \in R$ est dite anormale *(ou subit une* anomalie*) si les limites de son élasticité ont été franchies et une déformation irréversible a eu lieu selon le point de vue de l'utilisateur, autrement dit l'entité ne peut revenir à un état original même en présence de stimuli originaux.*

Enfin, le système de diagnostic a pour objectif de déterminer *l'état de santé réel* $\sigma_{\text{réel}}$ constitué de l'ensemble des entités anormales.

2.2 Diagnostic à base de modèle

En s'appuyant sur les notions et les notations décrites ci-dessus, nous rappelons brièvement le cadre classique du diagnostic à base de modèle qui est utilisé dans cet article (de Kleer & Williams, 1987) (Reiter, 1987).

Définition 2 (représentation du système)
La représentation d'un système est un couple (DS,COMPS) où :
1. *DS, la description du système dans cette représentation, est un ensemble de phrases du premier ordre.*
2. *COMPS, les composants du système dans cette représentation, est un ensemble fini de constantes.*

Nous supposons ici l'existence d'un isomorphisme entre les ensembles R et COMPS du fait que R est un ensemble défini par l'utilisateur et par les actions de maintenance sur les entités de R. Le prédicat Ab(c) (resp. $\neg$Ab(c)) signifie que le composant $c \in$ COMPS est anormal (resp. normal).

Les observations font partie des quelques liens entre le système réel et sa représentation. Intuitivement, les observations sont des captures d'information issues du système réel effectuées à l'aide d'un ensemble O de *capteurs* mesurant la valeur v(p) d'un paramètre réel p. Une fois acquises, ces observations sont confrontées à la représentation du système dans la forme dans laquelle v(p) et p sont effectivement représentés afin d'effectuer le diagnostic.

Définition 3 (Observations)
Les observations OBS forment un ensemble de phrases du premier ordre.

L'exemple suivant illustre un système réel, sa contrepartie qui est modélisée ainsi que des observations. Cet exemple servira de base tout au long de cet article.

Exemple 1
On considère le circuit de la figure 1 de Davis (Davis, 1984).

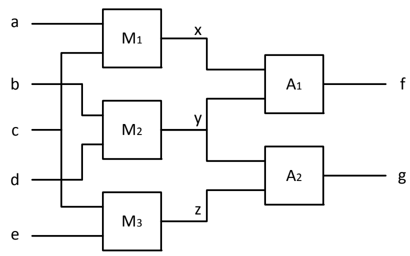

FIGURE 1 – Un circuit avec 3 multiplicateurs (M_1,M_2, M_3) *et 2 additionneurs* (A_1,A_2)*.*

Supposons que ce circuit soit représenté par COMPS = $\{M_1,M_2,M_3,A_1,A_2\}$ *et* DS[2]

2. Remarquons que dans cet exemple la première phrase de DS *est manifestement incorrecte car elle ne représente pas le comportement d'un multiplicateur réel.*

$M_1 desc : \neg Ab(M_1) \Rightarrow (v(x) = (v(a) + 1) * v(c))$
$M_2 desc : \neg Ab(M_2) \Rightarrow (v(y) = v(b) * v(d))$
$M_3 desc : \neg Ab(M_3) \Rightarrow (v(z) = v(c) * v(e))$
$A_1 desc : \neg Ab(A_1) \Rightarrow (v(f) = v(x) + v(y))$
$A_2 desc : \neg Ab(A_2) \Rightarrow (v(g) = v(y) + v(z))$

étendu avec les axiomes appropriés pour l'arithmétique en particulier. On suppose également que les paramètres a, b, c, d, e, f et g sont observés avec pour valeurs 1, 2, 3, 4, 5, 11 et 22 respectivement.

Étant donnés une représentation (DS,COMPS) et des observations OBS, il est possible désormais d'introduire la notion de *problème de diagnostic*.

Définition 4 (Problème de diagnostic)
Un problème de diagnostic est un triplet (DS,COMPS,OBS).

Finalement, la définition sémantique du diagnostic repose sur le concept d'*état de santé* s'appuyant sur la représentation du système $\sigma(\Delta, \mathrm{COMPS} \setminus \Delta) = [\bigwedge_{c \in \Delta} \mathrm{Ab}(c)] \wedge [\bigwedge_{c \in (\mathrm{COMPS} \setminus \Delta)} \neg \mathrm{Ab}(c)]$.

Définition 5 (Diagnostic (sémantique))
Soit $\Delta \subseteq COMPS$. Un diagnostic, $D_{T\text{-}M}$, pour (DS,COMPS,OBS) est l'ensemble des candidats $\sigma(\Delta, COMPS \setminus \Delta)$ tels que $DS \cup OBS \cup \sigma(\Delta, COMPS \setminus \Delta)$ est satisfiable.

La définition 5 fournit une sémantique parfaitement définie pour la notion de diagnostic. Néanmoins, comme elle est donnée en terme de modèles, elle offre peu d'intérêts au niveau algorithmique. La théorie de la démonstration offre une approche syntaxique et un environnement algorithmique plus attractif. C'est pourquoi nous considérons qu'il existe un démonstrateur automatique sous-jacent dans chaque *algorithme de diagnostic* $\mathcal{A}$. L'algorithme de (Reiter, 1987) utilise un tel démonstrateur de façon explicite.

Définition 6 (Diagnostic (syntaxique))
Un diagnostic (syntaxique) $D_{T\text{-}D}$ est l'ensemble de candidats calculé par l'algorithme de diagnostic $\mathcal{A}$ ($\vdash_{\mathcal{A}}$).

3 Caractérisation du méta-diagnostic

La section 2 a présenté les éléments servant à définir un système de diagnostic.

Définition 7 (Système de diagnostic)
Un système de diagnostic est un quadruplet (DS,COMPS,OBS,$\mathcal{A}$).

Comme mentionné dans l'introduction, les systèmes de diagnostic peuvent être eux-mêmes anormaux pour de nombreuses raisons : des erreurs de modélisation, des erreurs de perception (observations incertaines), des erreurs algorithmiques (l'algorithme ne produisant pas les candidats de diagnostic issus de la définition sémantique). Sachant que dans les applications réelles de telles anomalies sont loin d'être rares, il est nécessaire d'établir une théorie de méta-diagnostic dont la finalité est de raisonner sur le système de diagnostic lui-même. Afin d'obtenir une théorie générale, nous nous appuyons ici sur la logique du premier ordre. [3]

3. Les résultats de ce papier sont également valides pour un ensemble d'autres logiques.

3.1 Méta-système

Au niveau méta-diagnostic, les *méta-composants* sont associés aux éléments du système de diagnostic dont le comportement peut être suspecté comme étant normal ou anormal. Le comportement de ces composants, de même que leurs interactions sont décrits dans un méta-système à l'aide du prédicat unaire $\mathsf{M\text{-}Ab}(\cdot)$ sémantiquement associé à la présence d'une anomalie dans un méta-composant. Intuitivement, un méta-système rassemble donc la connaissance statique utilisée par le méta-diagnostic pour raisonner sur le système de diagnostic sous-jacent.

Définition 8 (Méta-système)
Un méta-système est un couple (DM-S,M-COMPS) où :
1. *DM-S, la description du méta-système, est un ensemble de phrases du premier ordre.*
2. *M-COMPS, les méta-composants, est un ensemble fini de constantes.*

Le choix des méta-composants dépend de l'objectif du raisonnement et des hypothèses de départ.
1. Il n'est pas nécessaire de considérer tous les éléments d'un système de diagnostic comme un méta-composant.
2. Les méta-composants peuvent être définis à différents niveaux d'abstraction.

Par exemple, si pour un problème donné, nous supposons que les algorithmes de diagnostic sont corrects et les observations normales, alors, afin de déterminer dans la représentation du système si chaque phrase décrit correctement le système réel, il suffit d'associer à chacune de ces phrases un méta-composant et uniquement à ces phrases. Ceci est illustré ci-dessous en s'appuyant sur l'exemple 1. Une possibilité pour DM-S avec M-COMPS=$\{\mathsf{M_1desc}, \mathsf{M_2desc}, \mathsf{M_3desc}, \mathsf{A_1desc}, \mathsf{A_2desc}, \mathsf{Alg}\}$ serait [4] :

$$\neg\mathsf{M\text{-}Ab(M_1desc)} \Rightarrow [\neg\mathsf{Ab(M_1)} \Rightarrow (\mathsf{v(x)} = (\mathsf{v(a)}+1)*\mathsf{v(c)})]$$
$$\neg\mathsf{M\text{-}Ab(M_2desc)} \Rightarrow [\neg\mathsf{Ab(M_2)} \Rightarrow (\mathsf{v(y)} = \mathsf{v(b)} * \mathsf{v(d)})]$$
$$\neg\mathsf{M\text{-}Ab(M_3desc)} \Rightarrow [\neg\mathsf{Ab(M_3)} \Rightarrow (\mathsf{v(z)} = \mathsf{v(c)} * \mathsf{v(e)})]$$
$$\neg\mathsf{M\text{-}Ab(A_1desc)} \Rightarrow [\neg\mathsf{Ab(A_1)} \Rightarrow (\mathsf{v(f)} = \mathsf{v(x)} + \mathsf{v(y)})]$$
$$\neg\mathsf{M\text{-}Ab(A_2desc)} \Rightarrow [\neg\mathsf{Ab(A_2)} \Rightarrow (\mathsf{v(g)} = \mathsf{v(y)} + \mathsf{v(z)})]$$

L'idée derrière la description DM-S est que si une DS-phrase n'est pas anormale, alors elle décrit correctement ce qui se passe en réalité.

3.2 Méta-observations

Les méta-observations sont utilisées en liaison avec les méta-systèmes afin de déterminer les anomalies des méta-composants.

Définition 9 (Méta-observations)
Les méta-observations M-OBS forment un ensemble fini de phrases du premier ordre.

La disponibilité des méta-observations peut avoir plusieurs sources : il peut s'agir d'informations issues de cas de tests dans lesquels l'état de santé réel $\sigma_{\mathsf{réel}}$ est connu, des résultats de diagnostic calculés par le système de diagnostic, des observations du système, etc. Les méta-observations regroupent ainsi toutes les observations disponibles au niveau système et au niveau méta-système. Dans l'exemple précédent, si l'état de santé

4. La section 5 présente plus clairement la méthode pour décrire un méta-système.

réel est connu et a produit l'ensemble d'observations OBS alors les méta-observations disponibles M-OBS sont :

1. $\sigma_{\text{réel}} \equiv \neg\text{Ab}(\text{M}_1)\wedge\neg\text{Ab}(\text{M}_2)\wedge\neg\text{Ab}(\text{M}_3)\wedge\neg\text{Ab}(\text{A}_1)\wedge\text{Ab}(\text{A}_2)$,
2. $\text{OBS}\equiv\text{v(a)}= 1\wedge\text{v(b)}= 2\wedge\text{v(c)}= 3\wedge\text{v(d)}= 4\wedge\text{v(e)}= 5\wedge\text{v(f)}= 11\wedge\text{v(g)}= 22$.

3.3 Méta-diagnostic

Un méta-système et un ensemble de méta-observations forment un problème de *méta-diagnostic*.

Définition 10 (Problème de méta-diagnostic)
Un problème de méta-diagnostic est un triplet (M-DS,M-COMPS,M-OBS).

La résolution d'un problème de méta-diagnostic consiste à déterminer les anomalies des méta-composants M-COMPS en s'appuyant sur les méta-observations.

Définition 11 (État de méta-santé)
Soit $\Phi \subseteq$ M-COMPS un ensemble de méta-composants, l'état de méta-santé $\pi(\Phi,$M-COMPS$\setminus\Phi)$ est la conjonction : $\bigwedge_{mc\in\Phi}$M-Ab(mc)]$\wedge$[$\bigwedge_{mc\in(\text{M-COMPS}\setminus\Phi)}\neg$M-Ab(mc).

Définition 12 (Méta-diagnostic)
Le méta-diagnostic M-D, pour le problème (M-DS,M-COMPS,M-OBS) est l'ensemble des candidats $\pi(\Phi,$M-COMPS$\setminus\Phi)$ tels que M-DS$\cup$M-OBS$\cup\pi(\Phi,$M-COMPS$\setminus\Phi)$ est satisfiable.

Au final, le lecteur pourra constater que les définitions 5 et 12 sont identiques. En effet, un problème de méta-diagnostic est un problème de diagnostic dont l'objet diagnostiqué est un système de diagnostic, ce qui conduit entre autres à ce que :

1. chaque algorithme de diagnostic existant peut être utilisé comme un algorithme de méta-diagnostic s'il est correct et complet au sens de la sémantique sous-jacente (Hodges, 1993).
2. chaque méthode pouvant réduire la complexité pratique du problème de diagnostic peut s'appliquer au problème de méta-diagnostic.

4 Propriétés des systèmes de diagnostic et de leur résultats

La section précédente décrit une caractérisation du méta-diagnostic suffisamment générique pour résoudre différents problèmes de méta-diagnostic. Avant d'en décrire certains en section 5, il est nécessaire de présenter un certain nombre de propriétés sur les systèmes de diagnostic dont l'absence est considérée comme anormale. Une liste plus exhaustive est proposée dans (Belard *et al.*, 2010).

4.1 Propriétés sur les résultats de diagnostic

La qualité d'un diagnostic peut être évaluée à l'aide de deux propriétés : la *validité* et la *certitude*.

Définition 13 (Validité)
Soit $\sigma_{réel}$ un état de santé tel que, pour chaque c$\in$COMPS, si c est l'image de r$\in$R : 1) si r est anormal, $\neg$Ab(c)$\wedge\sigma_{réel}\models\perp$; et 2) si r est normal, Ab(c)$\wedge\sigma_{réel}\models\perp$. Un résultat de diagnostic, D, est valide si $\sigma_{réel} \in$ D ; et invalide sinon.

Définition 14 (Certitude)
Un résultat de diagnostic, D, est certain s'il ne contient qu'un seul candidat, c.-à-d. $\#D{=}1$; et incertain sinon.

Disposer de résultats valides et certaines est extrêmement intéressant, notamment dans le monde aéronautique où les résultats invalides peuvent conduire les équipes de maintenance d'un appareil à remplacer de mauvais composants et où les résultats incertains augmentent naturellement le temps de la réparation.

4.2 Propriétés sur les observations

Dans cet article, nous ne citons qu'une propriété sur les observations : la véracité. Informellement, des observations sont dites *ontologiquement vraies* si la perception d'un paramètre réel est correct, autrement dit, si la mesure de la valeur du paramètre p est x alors la valeur du paramètre p est réellement x. Formellement :

Définition 15 (Véracité)
Soit Ω l'ensemble de toutes les structures et $\Psi \in \Omega$ l'ensemble des informations brutes sur la réalité du système[5]*. Les observations OBS sont ontologiquement vraies ssi $\exists_{s \in Mod(OBS)} \exists_{t \in \Omega}$ $(s \subseteq t) \wedge (t \rightleftharpoons \Psi)$ (Tarski, 1936).*

Il faut insister ici sur la différence entre la vérité logique et la vérité ontologique (véracité), la première étant fondée sur les axiomes d'une théorie et la deuxième s'appuyant sur une correspondance entre les phrases de la théorie et la réalité (Tarski, 1936). Sans observations ontologiquement vraies, les résultats de diagnostic au sens de la définition 5 ne sont pas garantis d'être valide au sens de la définition 13 comme nous le démontrerons plus tard à travers le théorème 1.

4.3 Propriétés sur la représentation du système

On identifie deux propriétés associées à la représentation du système : la véracité et la diagnosticabilité. Intuitivement si la représentation du système est ontologiquement vraie alors toute phrase X de DS énonce que X a effectivement lieu en réalité. Formellement,

Définition 16 (Véracité de la représentation du système)
Soit Ω l'ensemble de toutes les structures et $\Psi \in \Omega$ l'ensemble des informations brutes disponibles sur la réalité. Une représentation du système est ontologiquement vraie ssi, pour tout ensemble ontologiquement vrai OBS, $\exists_{s \in Mod(DS \cup OBS)} \exists_{t \in \Omega}$ $(s \subseteq t) \wedge (t \rightleftharpoons \Psi)$. Si la représentation du système est ontologiquement vraie alors toutes ses phrases le sont.

Comme pour la véracité des observations, la véracité de la représentation du système est essentielle pour garantir que tout diagnostic au sens de la définition 5 soit valide comme nous le montrerons plus tard.

Concernant la diagnosticabilité de la représentation du système, nous reprenons la définition de (Console *et al.*, 2000) avec nos termes :

Définition 17 (Diagnosticabilté)
La représentation du système, associé avec un ensemble de capteurs O, est diagnosticable ssi pour tout ensemble d'observations ontologiquement vrai, il existe toujours un et un seul candidat de diagnostic au sens de la définition 5.

5. Pour une discussion détaillée, voir la sous-section 2.1.

L'intérêt de la diagnosticabilité est motivé par le besoin de fournir des diagnostics certains.

4.4 Propriétés sur l'algorithme de diagnostic

Comme on l'a vu, un algorithme de diagnostic peut être vu comme un démonstrateur de théorèmes, deux propriétés lui sont associées : la correction et la complétude.

Définition 18 (Correction et complétude)
Soit T une théorie logique et φ une phrase dans un langage $\mathcal{L}$ pour une sémantique donnée. Un algorithme de diagnostic $\mathcal{A}$ est correct ssi : si ($T \vdash_{\mathcal{A}} \varphi$), alors ($T \models_{\mathcal{L}} \varphi$). Il est complet ssi : si ($T \models_{\mathcal{L}} \varphi$), alors ($T \vdash_{\mathcal{A}} \varphi$).

Par définition, un algorithme de diagnostic correct et complet rend équivalent les notions de diagnostic sémantique et de diagnostic syntaxique (voir définition 6). C'est la raison essentielle de ces propriétés qui sont requises, par exemple, dans le démonstrateur sur lequel s'appuie l'approche de Reiter (Reiter, 1987). On pourrait se demander quel est l'intérêt de méta-diagnostiquer si un algorithme est correct ou pas, complet ou pas, sachant qu'il suffirait de garantir par construction les propriétés d'un tel algorithme. Là encore, le problème est lié aux applications réelles dont la complexité fait que certains algorithmes de diagnostic ne peuvent être modélisés dans un cadre logique ou bien encore, le fonctionnement même de l'algorithme n'est pas connu de l'utilisateur final (l'intégrateur en aéronautique par exemple) pour des raisons de confidentialité.

5 Quelques problèmes de méta-diagnostic

Avec la caractérisation présentée en section 3 et les propriétés décrites en section 4 il est possible de modéliser et de résoudre des problèmes de méta-diagnostic typiques. Le processus de modélisation est constitué de 4 étapes :

1. définition des méta-composants en s'appuyant sur les hypothèses du problème et le niveau de détail de la solution ;
2. définition des propriétés dont l'absence est considérée anormale ;
3. définition des comportements normaux et anormaux des méta-composants ;
4. définition des méta-observables.

Pour résoudre les problèmes suivants, nous avons directement utilisé GDE (*General Diagnostic Engine*) (de Kleer & Williams, 1987)(Forbus & de Kleer, 1993). Ceci a été possible du fait que tout algorithme de diagnostic correct et complet peut devenir un algorithme de méta-diagnostic, ce qui est le cas de GDE.

5.1 Le problème de la représentation erronée d'un système

Posons le problème suivant : « soit le système de diagnostic (DS, COMPS, OBS, $\mathcal{A}$), supposons que OBS soit ontologiquement vrai et que $\mathcal{A}$ soit correct et complet, déterminer des phrases ontologiquement fausses dans DS ». La résolution de ce problème requiert le théorème suivant :

Théorème 1
Si (DS,COMPS) est ontologiquement vrai, alors pour tout problème (DS, COMPS, OBS) avec des observations ontologiquement vraies, le diagnostic sémantique $D_{T\text{-}M}$ est valide.

Preuve Démontrons par contrapposition. Supposons que $\sigma_{\text{réel}}$, l'état de santé réel, ne soit pas un candidat de diagnostic au sens de la définition 5 : $\mathsf{DS} \cup \mathsf{OBS} \cup \sigma_{\text{réel}}$ est donc non-satisfiable, il n'a pas de modèle. L'état $\sigma_{\mathsf{réel}}$ étant issu de la réalité, il doit avoir un modèle s tel que $\exists_{\mathsf{t}\in\Omega}$ $(\mathsf{s}\subseteq\mathsf{t})\wedge(\mathsf{t}\rightleftharpoons\Psi)$ et par conséquent $\neg(\exists_{\mathsf{s}\in\mathsf{Mod(DS\cup OBS)}}$ $\exists_{\mathsf{t}\in\Omega}$ $(\mathsf{s}\subseteq\mathsf{t})\wedge(\mathsf{t}\rightleftharpoons\Psi))$. Comme les observations sont ontologiquement vraies, la représentation du système ne l'est donc pas.

Imaginons l'instance du problème suivant issu de l'exemple 1.

1. Les méta-composants sont les phrases de DS.
2. La propriété requise est la véracité de chaque phrase de DS.
3. Considérons la phrase A de DS représentée par le méta-composant mc_1 : soit A est ontologiquement vraie, soit mc_1 est anormal, c.-à-d. $\mathsf{M\text{-}Ab(mc_1)} \vee \mathsf{A}$. Ainsi le comportement normal de cette phrase est $\neg\mathsf{M\text{-}Ab(mc_1)} \Rightarrow \mathsf{A}$.
4. À partir du théorème 1 et des hypothèses de ce problème, on sait que si chaque méta-composant est normal alors le diagnostic sémantique est valide. Il suffit donc de méta-observer l'état de santé réel et les observations du système. [6]

Suivant ce processus de modélisation, on obtient le DM-S et les M-COMPS de l'exemple 1. Si on suppose que les M-OBS sont ceux de ce même exemple, on obtient par GDE le méta-diagnostic suivant constitué de 3 diagnostics minimaux (noyaux) : $\{\mathsf{M_1desc}\}$; $\{\mathsf{M_2desc}\}$; $\{\mathsf{A_1desc}\}$. Bien que ambigu, le méta-diagnostic inclut bien la non-véracité de la phrase $\mathsf{M_1desc}$.

5.2 Le problème de la diagnosticabilité de la représentation du système, de la correction et de la complétude des algorithmes de diagnostic

Supposons maintenant que la phrase $\mathsf{M_1desc}$ ait été corrigée, nous posons désormais l'hypothèse que la représentation du système est ontologiquement vraie. Investigons le problème suivant : « déterminer si la représentation du système associée aux capteurs O est diagnosticable et si l'algorithme de diagnostic est correct et complet ». Là encore, un certain nombre de théorèmes sont nécessaires pour résoudre ce problème.

Théorème 2
Si $\mathcal{A}$ est correct et complet et si (DS,COMPS) est ontologiquement vrai, alors pour tout problème (DS,COMPS,OBS) où OBS est ontologiquement vrai, le diagnostic $D_{T\text{-}D}$ est valide.

Preuve $\mathcal{A}$ étant correct et complet, $\mathsf{D_{T\text{-}D}}$ et $\mathsf{D_{T\text{-}M}}$ sont équivalents, d'où le résultat par le théorème 1.

Théorème 3
Si $\mathcal{A}$ est correct et complet et si (DS,COMPS) est ontologiquement vrai et de plus diagnosticable à partir des capteurs O, alors, pour tout problème (DS,COMPS,OBS) où OBS est ontologiquement vrai, tout diagnostic $D_{T\text{-}D}$ est valide et certain.

Preuve Résultat issu de la définition 17 et du théorème 2.

Reprenons une fois encore l'exemple 1 mais avec la version corrigée de $\mathsf{M_1desc}$ et modélisons le problème.

1. Méta-composants : l'algorithme Alg et la description DS.

6. Dans de nombreuses applications réelles, il est possible, a posteriori, d'observer avec certitude l'état de santé réel ou du moins une partie. Dans le domaine aéronautique, par exemple, cette observations se fait au cours de (voire après) la réparation où des tests systématiques et poussés aboutissent à cette observation.

2. Propriétés étudiées : diagnosticabilité de DS muni des capteurs O, correction et complétude de Alg.
3. Le théorème 2 donne le bon comportement de Alg à savoir $\neg$M-Ab(Alg) $\Rightarrow$ ($\sigma_{\text{réel}}$ $\Rightarrow$ Dis($D_{\text{T-D}}$)) où Dis($D_{\text{T-D}}$) est la disjonction représentant l'ensemble $D_{\text{T-D}}$. Le théorème 3 donne le bon comportement de DS : $\neg$M-Ab(Alg)$\wedge\neg$M-Ab(DS) $\Rightarrow$ (#$D_{\text{T-D}}$ =1).
4. Les méta-observables sont $D_{\text{T-D}}$ et l'état de santé réel $\sigma_{\text{réel}}$.

Maintenant, imaginons que $\sigma_{\text{réel}} = \neg\text{Ab}(M_1)\wedge\ \neg\text{Ab}(M_2)\wedge\ \neg\text{Ab}(M_3)\wedge\ \neg\text{Ab}(A_1)\wedge\ \text{Ab}(A_2)$ et que le diagnostic $D_{\text{T-D}}$ issu de l'algorithme $\mathcal{A}$ soit l'ensemble des candidats couverts par les diagnostics noyaux suivants : $\{A_2\}$, $\{A_1\wedge M_2\}$, $\{M_3\}$ and $\{M_1\wedge M_2\}$. GDE retourne alors les deux diagnostics nouyaux suivants : {Alg} ; {DS}.

Ce premier résultat de méta-diagnostic nous informe d'une anomalie sur les méta-composants mais n'est pas satisfaisant. Sachant que le méta-diagnostic est un raisonnement monotone (DM-S étant issu de théorèmes mathématiques, et M-OBS étant ontologiquement vrai), on peut utiliser d'autres cas de tests pour raffiner le résultat. Supposons par exemple, le nouveau jeu de méta-observations suivant : $\sigma_{\text{réel}} = \neg\text{Ab}(M_1) \wedge \neg\text{Ab}(M_2) \wedge \neg\text{Ab}(M_3) \wedge \neg\text{Ab}(A_1) \wedge \text{Ab}(A_2)$ et le diagnostic $D_{\text{T-D}}$ est l'ensemble des candidats couverts par les diagnostics noyaux suivants : $\{A_1\wedge M_2\}$, $\{M_3\}$ and $\{M_1\wedge M_2\}$. Il en résulte le méta-diagnostic suivant {Alg} stipulant un problème d'incorrection ou d'incomplétude dans l'algorithme et non pas un problème de diagnosticabilité dans DS.

6 Conclusions

Dans cet article, nous avons proposé une théorie générale de méta-diagnostic et avons modélisé et résolu deux problèmes communs de méta-diagnostic. Un problème de méta-diagnostic est posé comme un problème de diagnostic si bien que les outils de diagnostic disponibles et les techniques pour gérer la complexité algorithmique sont les mêmes, comme l'utilisation de GDE le montre ici. Le méta-diagnostic a de nombreuses applications, tant dans le monde académique qu'industriel. Citons par exemple le cas de la maintenance en aéronautique où la détection d'erreurs et la validation automatique d'algorithmes « boîtes noires » est un enjeu crucial.

Références

BELARD N., PENCOLÉ Y. & COMBACAU M. (2010). Defining and exploring properties in diagnostic systems. In *DX-10 21th International Workshop on Principles of Diagnosis*.

CONSOLE L., PICARDI C. & RIBAUDO M. (2000). Diagnosis and diagnosability analysis using pepa. In *ECAI*.

DAVIS R. (1984). Diagnostic reasoning based on structure and behavior. *Artif. Intell.*, **24**(1-3).

DE KLEER J. & WILLIAMS B. C. (1987). Diagnosing multiple faults. *Artif. Intell.*, **32**(1).

FORBUS K. D. & DE KLEER J. (1993). *Building Problem Solvers*. M.I.T. University Press.

HODGES W. (1993). *Model Theory*. Number 42 in Encyclopedia of Mathematics and its Applications. Cambridge University Press.

REITER R. (1987). A theory of diagnosis from first principles. *Artif. Intell.*, **32**(1).

TARSKI A. (1936). The concept of truth in formalized languages. In *Logic, Semantics, Metamathematics*. Oxford : Oxford University Press.