

Formation d'expériences dans un apprentissage à boucle fermée.

LM. Veillon¹

G. Bourgne²

^{1 2} LIP6, UPMC

Paris VI

lise.marie.veillon@gmail.com

06/02/2014

Résumé

Cet article propose une nouvelle approche de la formation d'expériences que l'on peut trouver dans un apprentissage en boucle fermée. Il s'agit de considérer une approche de recherche de conséquences similaire pour la formation d'hypothèses et la formation d'expériences. Les connaissances sont modélisées par une théorie centrale en logique du premier ordre et améliorées par apprentissage actif. Suite à un exemple de son implémentation sur le thème de la toxicologie de Claude Bernard, certains moyens et problématiques de cette approche sont mis en exergue pour être poursuivis ultérieurement. Le choix d'expériences peut être guidé par différentes stratégies, fonctions de l'exhaustivité de l'étude et de la qualité de la planification.

Mots Clef

apprentissage actif en boucle fermée, SOLAR, hypothèses, expériences, observations, logique du premier ordre, Claude Bernard, induction, recherche de conséquences.

Abstract

This paper is about new means for experimental design as it can be used in closed loop machine learning. It is a way to consider hypothesis formation and experimental design alike. Knowledge is modeled by a first order logic core theory and aims to be improved with active learning. The example of Claude Bernard's experimental studies about toxicology raises many issues and highlights some techniques about modeling non trivial theories. Various strategies are to be chosen to carry out experimental design in accordance to resources available and a quality level for planification.

Keywords

closed loop machine learning, SOLAR, hypothesis, experiments, first order logic, Claude Bernard, induction, consequence finding.

1 Introduction

La méthode expérimentale sert depuis longtemps la recherche de connaissances nouvelles. L'apprentissage en boucle fermée [6, 3] s'en inspire également. Elle repose sur des principes d'induction et d'abduction. En formant des hypothèses à partir d'observations inexplicables par les connaissances et confrontant celles-ci à l'expérimentation elle vise à en rehausser une au rang de nouveau savoir. On peut comprendre cette méthode comme un cycle de vie des hypothèses [1] qui se décompose en trois étapes : la formation des hypothèses, le design d'expériences discriminantes et la conduite de ces expériences. L'analyse des résultats obtenus permet de revenir à la première étape en affinant l'ensemble d'hypothèses étudiées.

L'étape d'expérimentation, éventuellement simulée, est conventionnelle et ne constitue pas un raisonnement de pensée mais la réalisation d'un protocole déjà établi. L'intérêt se porte ici plus particulièrement sur les deux autres étapes. De précédents travaux, concernant la formation d'hypothèses, s'avèrent inspirants pour envisager le design expérimental avec une approche d'*inverse entailment*. Il est alors possible de considérer un apprentissage en boucle fermée utilisant cette méthode.

Dans un premier temps, la section 2 présente un rappel du principe de formation d'hypothèses qui servira de base pour exposer, en section 3 la méthode de formation d'expériences, qui sera illustrée par un exemple. La section 4 propose ensuite une étude de cas portant sur la toxicologie de Claude Bernard qui ouvrira en section 5 une discussion sur les difficultés soulevées par l'approche. Enfin la section 6 conclue l'article.

2 Préliminaires

2.1 Cycle de vie des hypothèses

Le principe de ce cycle est de raffiner l'ensemble des hypothèses plausibles, pour qu'il n'en reste plus qu'une seule qui sera donc la solution. A chaque cycle, une nouvelle information est apportée en tant qu'observation lors d'une expérience. Seules les hypothèses qui permettent d'expliquer ces informations sont conservées. Afin que la re-

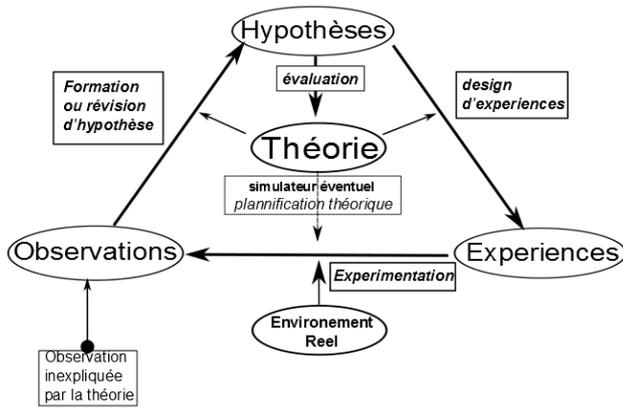


FIGURE 1 – Cycle de vie d'une hypothèse

cherche soit la plus efficace possible l'expérience à mener est déterminée par une phase de design expérimental dont l'objectif est de trouver le protocole le plus efficace pour discriminer un plus grand nombre d'hypothèses. Considérant que les connaissances ne sont pas parfaites et la théorie étudiée non plus, on peut également n'obtenir aucune hypothèse par ce processus et remettre alors en cause la théorie ou les biais de langage. Il est dans ce cas intéressant d'obtenir des indications sur les éléments paradoxaux. Ce cycle, illustré en figure 1, consiste donc à former un ensemble d'hypothèses, puis, si l'évaluation le requière, construire une expérience pertinente (design d'expérience) qui, une fois réalisée en environnement réel (expérimentation), apporte de nouvelles observations, qui permettront de réviser les hypothèses et continuer le cycle. L'évaluation des hypothèses permet idéalement de reconnaître une erreur dans la théorie ou de l'améliorer par l'ajout d'une nouvelle connaissance. Il est cependant possible que le cycle s'interrompe pour nombre d'autres raisons allant de l'imperfection de la modélisation de la théorie au manque de moyens techniques pour réaliser une expérience discriminante.

Il sera ici considéré une théorie logique du premier ordre. La théorie ainsi que les hypothèses sont des clauses (faits ou règles). Les expériences seront représentées par un ensemble de faits décrivant les conditions initiales et les opérations effectuées. De même les observations seront des faits. Quelques définitions vont apporter plus de précisions concernant ces principaux éléments.

Expériences réalisables : Nous considérerons que les expériences sont réalisables si elles respectent plusieurs critères :

- sémantiques : qu'elles aient un sens dans l'absolu, notamment par rapport aux contraintes propres au domaine considéré,
- contextuels : qu'elles aient un sens à l'époque et au lieu considéré, prenant en compte le matériel disponible par exemple
- représentationnels : qu'elles existent et soient modéli-

sées dans la théorie logique

Pour une théorie donnée ces critères pourront être assurés par des restrictions de langage indiquant quels prédicats peuvent être utilisés pour représenter une expérience. Ce biais de langage ainsi formé permettra aussi de limiter le nombre d'expériences considérées.

A propos des observations : Une manifestation est une observation qui doit être expliquée par la théorie considérée [9]. Constaté une manifestation dans un contexte pour lequel la théorie ne démontre pas cette observation est un moyen de montrer que la théorie est incomplète et doit être améliorée. La négation de l'observation est souvent un cas par défaut, sous-entendu par le modèle logique, et peut même ne pas être observable. Par exemple dans la Théorie de Claude Bernard, concernant la médecine, il faut expliquer la mort en tant que manifestation mais pas le fait d'être vivant. La considération d'observations qui ne soient pas des manifestations revient à tenir compte d'informations qui peuvent être partielles. Il faut alors tenir compte d'incertitudes dues aux lacunes de connaissances. Si ce problème va se poser lors de l'étude de cas plus pratique, elle ne sera pas abordée dans un premier temps explicatif où toute observation sera considérée comme une manifestation. De même que pour les expériences, un biais de langage est mis en place sur les observations possibles.

2.2 Formation d'hypothèses par conséquence inverse

La première étape du cycle étudié est la formation d'hypothèse. Elle peut se formaliser de la façon suivante :

Définition 1 (Problème de formation d'hypothèses)

Entrée :

- une théorie \mathcal{T}
- une observation $O = o_1 \wedge \dots \wedge o_n$
- un biais de langage pour les hypothèses : Γ

Sortie : l'ensemble des hypothèses candidates H tel que :

$$\forall (h = h_1 \wedge \dots \wedge h_n) \in H$$

- (i) $\mathcal{T} \vee h \models O$
- (ii) $\mathcal{T} \vee h$ cohérent
- (iii) chaque h_j est un élément du biais de langage Γ

Exemple 1 (Les produits de laboratoire) Contexte : Dans un laboratoire on trouve un flacon sans étiquette. Le laboratoire dispose de trois produits bien identifiés $P1$, $P2$, $P3$ dont on connaît les propriétés d'inflammabilité et d'acidité. Les produits possibles sont $P1$, $P2$ et $P3$; Le produit inflammable est $P1$; Le produit acide est $P3$.

soit la théorie \mathcal{T} :

$$\begin{aligned} &\neg \text{produitPresent}(p_1) \vee \text{presenceDUNProduit} \\ &\neg \text{produitPresent}(p_2) \vee \text{presenceDUNProduit} \\ &\neg \text{produitPresent}(p_3) \vee \text{presenceDUNProduit} \\ &\neg \text{produitPresent}(p_1) \vee \text{inflammable} \\ &\neg \text{produitPresent}(p_3) \vee \text{acide} \\ &\neg \text{inflammable} \vee \neg \text{FaireEtincelle} \vee \text{flamme} \\ &\neg \text{acide} \vee \neg \text{VerserSurCalcaire} \vee \text{reaction} \end{aligned}$$

Les biais de langages choisis :

- **Observations** $\{presenceDUnProduit, flamme, reaction\}$
- **Hypothèses** $\{produitPresent(p_1), produitPresent(p_2), produitPresent(p_3)\}$
- **Interventions** $\{FaireEtincelle, VerserSurCalcaire\}$

Selon le principe de la conséquence inverse (*inverse entailment*) [7], la formation d'hypothèses peut être vue comme une recherche de conséquences. Les critères des hypothèses candidates peuvent alors se traduire de la façon suivante :

(i) $\mathcal{T} \cup \{\neg o_1 \vee \dots \vee \neg o_n\} \models \neg h_1 \vee \dots \vee \neg h_n$

(ii) $\mathcal{T} \not\models \{\neg h_1 \vee \dots \vee \neg h_n\}$

(iii) chaque $\neg h_j$ est un élément du biais de langage $\bar{\Gamma}$.

Nous allons maintenant voir comment cette reformulation se traduit naturellement en SOLAR.

2.3 Résolution par découverte de conséquences avec SOLAR

Soit Σ une théorie clausale. Toute clause C telle que $\Sigma \models C$ est appelée *conséquence* de Σ . Pour se focaliser sur les conséquences "intéressantes", on introduit les notions de champs de production et de clauses caractéristiques [5], permettant de traduire des biais de langage. Étant donné un champs de production $P = \langle L \rangle$ où L est un ensemble de littéraux, une clause C appartient à P ssi C est une disjonction d'éléments de L . L'ensemble des *clauses caractéristiques* de Σ relativement à P , noté $Carc(\Sigma, P)$, est alors défini comme l'ensemble des conséquences de Σ minimales pour la subsomption et appartenant à P .

Quand on ajoute une clauses C à Σ , de nouvelles conséquences peuvent être obtenues. On appellera *nouvelles clauses caractéristiques*, l'ensemble minimal pour la subsomption des nouvelles conséquences appartenant à P , noté $Newcarc(\Sigma, C, P)$. On a $Newcarc(\Sigma, C, P) = Carc(\Sigma \cup C, P) \setminus Carc(\Sigma, P)$. SOLAR (SOL for advanced reasoning) est un outil de découverte de conséquences en logique clausale du premier ordre fonctionnant sur le principe de la méthode des tableaux SOL [8] qui permet de calculer $Newcarc(\Sigma, C, P)$ à partir de Σ, C et P .

Selon la reformulation du problème de formation d'hypothèses, on cherche $\neg H$ qui soit la conséquence de $\mathcal{T} \cup \neg O$ sans être la conséquence de \mathcal{T} en respectant le biais de langage $\bar{\Gamma}$. Cela correspond exactement à $Newcarc(\mathcal{T}, \neg O, \bar{\Gamma})$.

Exemple 2 (Suite des produits de laboratoire)

Observation inexplicquée : Il y a un produit présent sans qu'on puisse l'identifier :

On observe O_0 : $presenceDUnProduit$.

Formation d'hypothèses avec SOLAR

Une fois adaptée à son format, SOLAR peut résoudre : $\mathcal{T} \cup \neg O_0 \models \neg h$

Le problème est satisfiable et trois conséquences sont obtenues ($\neg produitPresent(p_2)$, $\neg produitPresent(p_3)$, $\neg produitPresent(p_1)$). Ce sont donc les trois hypothèses minimales du problème. Si l'on considère que le produit est nécessairement pur, la liste des hypothèses est ici exhaustive mais c'est rarement le cas.

La première évaluation des hypothèses (trois hypothèses restantes) indique qu'il faut entrer dans la boucle discriminante.

3 Formation d'expérience

3.1 Recherche d'expériences

On a maintenant un ensemble d'hypothèses candidates pour compléter la théorie \mathcal{T} . La phase de design expérimental doit produire des expériences qui permettent de discriminer ces hypothèses en fonction d'un observation donnée. Il s'agira donc de trouver un couple (E, o) , formé d'une expérience E (de zero à plusieurs faits) et une observation o (un seul fait) tel que l'observation ou non de o lorsqu'on réalise E permette d'éliminer des hypothèses.

Définition 2 (Couple discriminant) Soit E une expérience et o une observation, le couple (E, o) sera dit *discriminant* pour h et \mathcal{T} ssi :

– $X^+(E, o) = \{h \in H \mid \mathcal{T} \cup E \cup h \models o \text{ et } \mathcal{T} \cup E \cup h \text{ cohérent}\}$ est non vide et

– $X^-(E, o) = \{h \in H \mid \mathcal{T} \cup E \cup h \not\models o\}$ est non vide.

$X^+(E, o)$ (resp. $X^-(E, o)$) représente l'ensemble des hypothèses de H qui prédisent (resp. ne prédisent pas) l'observation o lors de la réalisation de E . Si les deux ensembles sont non vide, l'une des prédictions sera forcément fautive et des hypothèses pourront être éliminées dans la phase de révision. La recherche d'expériences se traduira donc par la recherche de couples (E, o) discriminants pour H et \mathcal{T} .

Révision des hypothèses qui découle des résultats de l'expérimentation réelle du couple (E, o) sélectionné :

Si, lors de l'expérience, o est observée alors toutes les hypothèses qui contredisent o ou qui ne suffisent pas à l'expliquer doivent être éliminées. $X^-(E, o)$ représente cet ensemble d'hypothèses incohérentes ou incomplètes avec la manifestation o . $X^+(E, o)$ représente donc l'ensemble des hypothèses à la fois cohérentes et complètes.

Si o n'est pas observée, il ne faut éliminer que ce qui est incohérent avec cette information soit $X^+(E, o)$. La complétude n'est ici pas recherchée et l'intégralité de $X^-(E, o)$ est conservé.

Algorithme simple : On cherche maintenant à automatiser cette recherche. En s'inspirant de la formation d'hypothèses, le design expérimental peut aussi être posé comme un problème de recherche de conséquences.

Un premier algorithme permet de trouver un couple (E, o) discriminant à partir de la première hypothèse h_1 .

– $\mathcal{T} \cup h_1 \models \neg E \vee O$

⇒ obtient un couple (E, o) et $h_1 \in X^+(E, o)$ (donc non vide).

- $\neg E \vee O$ est une clause respectant le biais de langage
- vérification 1 : si $\mathcal{T} \models \neg E \vee O$ le couple est trivial et inintéressant. SOLAR calculant les nouvelles clauses caractéristiques, ces couples sont naturellement exclus. Un autre couple trivial est (\emptyset, O_0) ou tout autre couple déjà utilisé. On peut exclure le couple des résultats en l'ajoutant à la théorie, le temps de la recherche.
- vérification 2 : chercher h_i tel que $\mathcal{T} \cup h_i \cup E \cup \neg O$ soit cohérent. ($\Rightarrow h_i \in X^-(E, o)$) Ce qui permet d'assurer $X^-(E, o)$ non vide.

Si la recherche à partir de h_1 ne donne aucun couple, la recherche peut être faite successivement à partir des autres hypothèses.

Exemple 3 (Suite des produits de laboratoire) Tous les axiomes, c'est à dire \mathcal{T} , sont conservés.

On ajoute (\emptyset, O_0) à la théorie :

$$\mathcal{T}_1 = \mathcal{T} \cup \{ \text{faireEtincelle} \vee \text{verserSurCalcaire} \vee \text{presenceProduit} \}$$

La nouvelle clause ajoutée est l'hypothèse considérée : $C = \text{produitPresent}(p1)$

Le nouveau champ de production : $P = \{ \neg \text{faireEtincelle}, \neg \text{verserSurCalcaire}, \text{flamme}, \text{reaction} \}$

On obtient : $(\neg \text{faireEtincelle} \vee \text{flamme})$

L'hypothèse $\text{produitPresent}(p1)$ permet d'obtenir le couple $(\text{faireEtincelle}, \text{flamme})$. De même l'hypothèse $\text{produitPresent}(p3)$ permet d'obtenir le couple $(\text{verserSurCalcaire}, \text{reaction})$. Tandis que, l'hypothèse $\text{produitPresent}(p2)$ ne permet pas de trouver de couple.

Ces couples (E, o) sont obtenus tels que $X^+(E, o)$ soit non vide, pour qu'ils soient retenus il faut également vérifier que $X^-(E, o)$ soit non vide.

Pour la vérification de $(\text{faireEtincelle}, \text{flamme})$ obtenue à partir de $\text{produitPresent}(p1)$, on teste sur l'hypothèse suivante. On ajoute temporairement $\text{produitPresent}(p2)$ à la théorie \mathcal{T} , ainsi que faireEtincelle et $\neg \text{flamme}$. La théorie ainsi formée étant satisfiable, $\text{produitPresent}(p2)$ est une hypothèse qui ne suffit pas à expliquer (ou contredit) l'observation flamme lors de l'expérience faireEtincelle . Donc $P_2 \in X^-(\text{faireEtincelle}, \text{flamme})$ et le couple est retenu.

3.2 Valuation des couples

S'il est possible de chercher plusieurs couples, (ou mieux, tous) une évaluation de ceux-ci peut permettre de choisir l'expérience retenue de manière optimisée. Le pouvoir discriminant d'un couple (E, o) est donc défini comme la proportion d'hypothèses éliminées dans le pire des cas.

Pouvoir discriminant P d'un couple (E, o) pour un ensemble d'hypothèses H :

$$P(E, o) = \frac{\min(|X^+(E, o)|, |X^-(E, o)|)}{|H|} \quad (1)$$

Ce résultat peut être étendu pour une expérience et un ensemble d'observations $O^* = \{o_1..o_n\}$

$$P(E, O^*) = 1 - \max(| \bigcap_{\substack{1 \leq i \leq n \\ \alpha \in \{+, -\}}} \{X^\alpha(E, o_i)\} |) \quad (2)$$

En considérant que tous les couples (E, o_i) considérés sont des couples candidats, $0 < P(E, o_i) < 1$ et $0 < P(E, O^*) < 1$.

Exemple 4 (Cas des produits de laboratoire) –

$$P(\text{VerserSurCalcaire}, \text{reaction}) = 1/3$$

$$- P(\text{FaireEtincelle}, \text{flamme}) = 1/3$$

4 Etude de cas : toxicologie de Claude Bernard

Les études toxicologiques de Claude Bernard [2] constituent un bon exemple pour illustrer ce modèle. En s'appuyant sur les travaux menés au cours du projet Cybernard, le cas de l'étude de l'effet des substances toxiques, dont en particulier le curare, sur l'organisme se montre pertinent [4]. De plus grande envergure que l'exemple des produits de laboratoire, c'est un exemple d'expérience de pensée concernant la méthode expérimentale, amplement décrit et consigné par Claude Bernard. En tant que médecin, enseignant et chercheur, il a conduit de nombreuses expériences sur les animaux afin d'améliorer notamment les connaissances médicales concernant les effets de substances toxiques. Un premier modèle logique permet de considérer un ensemble d'observations et d'interventions dans un contexte d'étude limité à un organisme et un ensemble d'hypothèses formulables. L'organisme étudié est un circuit fermé d'organes et de vaisseaux partageant un milieu intérieur, le sang. Les actions possibles sont de poser ou enlever un garrot, de poser ou enlever une respiration artificielle et d'injecter une substance. Cet exemple d'étude s'inscrit dans le temps et demande une séquentialité dans les interventions. Les effets des interventions peuvent être à court, moyen ou long terme. Un paramètre de chaque constituant de l'organisme est le moment pour lequel il est décrit. Le paramètre du temps multiplie rapidement la complexité du système logique donc il est nécessaire de limiter les valeurs qu'il peut prendre. On considère qu'un pas de temps peut être bref, court, long et très long, chacun négligeable devant le suivant. Les conséquences dépendent de la durée, s'il suffit d'un bref instant pour qu'une substance soit présente dans le sang à cause d'une injection il faut un temps au moins court pour qu'il se propage et au moins long pour qu'il soit filtré s'il existe un organe qui le permet. De plus si l'on attribue la mort de l'animal à l'arrêt de sa respiration ou des battements de son cœur, il faut également un temps long pour que l'implication soit avérée, ce qui permet de réagir, en particulier avec l'utilisation de respiration artificielle. Un temps très long va permettre de faire disparaître tous les effets qui ne sont pas définitifs

en atteignant un état stable du système. Bien qu'un grand nombre d'observations soient prises en note concernant des descriptions visuelles de l'organisme, peu sont finalement pertinentes et seuls la respiration et les battements de cœur sont conservés. Cet exemple révèle un autre problème, la connaissance partielle du système. Certains éléments ont des implications s'ils sont présents ou absents. Par exemple il est important de pouvoir déterminer si un organe est actif ou non. Si le poumon est actif, l'organisme vit et les autres organes fonctionnent, s'il n'est plus actif, il meurt. Bien que ce soit la mort que l'on cherche à expliquer, la vie bien qu'étant le cas par défaut doit être explicitée pour pouvoir tirer les conclusions de l'expérience.

4.1 Temps et séquentialité des états

Deux modèles de temps ont été envisagés. Le premier, utilisant un pas de temps régulier produit rapidement un grand nombre d'états à considérer. Le second considère la possibilité d'enchaîner trois types de durée. Une durée brève permet d'intervenir à un moment précis, tandis qu'une courte permet de faire apparaître les premiers symptômes et une longue, d'atteindre un état stable du système. Pour des raisons de simplicité, les interventions sont effectuées au début d'un pas de temps bref et tout pas de temps doit être précédé d'un autre de durée immédiatement inférieure. Comme il s'agit de modéliser un grand laps de temps durant lequel il faut identifier des effets immédiats, à court et à moyen terme et en même temps limiter le nombre d'étapes pour conserver un problème d'une taille manipulable, c'est le deuxième modèle qui s'est imposé pour cet exemple.

4.2 Choix d'un nombre restreint d'états décrits qualitativement

L'utilisation de valeurs numériques est très tentante surtout lorsque l'on connaît précisément certains effets simples. Si la précision peut être obtenue avec des réactions chimiques, il en va différemment en biologie où chaque organisme réagit de manière légèrement différente. Une valeur chiffrée correspondra par exemple à la dose létale 50 pour une substance mortelle. (rappel : quantité de substance à l'exposition de laquelle, la moitié d'une population meurt). La précision demande alors toujours plus de détails qui sont tout autant de complications, soit par la quantité d'informations gérées soit par l'imprécision même des connaissances concernant certains éléments. Afin de limiter les cas étudiés, comme pour le temps, on peut faire appel à un nombre limité de valeurs qualitatives. La difficulté réside alors dans le choix et la quantité de valeurs choisies. Au lieu d'utiliser une précision potentiellement excessive, un modèle plus qualitatif est à la fois plus correct et plus léger. Il demande cependant à l'expérimentateur de faire appel à ses connaissances et bon sens pour exploiter au mieux le protocole fourni. Ce qui était déjà le cas pour des valeurs numériques mais moins ostensiblement.

4.3 Résultats

Les résultats concernant cette théorie plus complexe en sont encore aux balbutiements. L'observation de l'arrêt de la respiration lors d'une injection de curare permet d'obtenir l'hypothèse d'un effet de poison destructeur de l'activité du muscle abdominal bien qu'il soit nécessaire pour cela d'ajouter le prédicat de filtrage en cours (d'une substance par un organe) au champ de production. La recherche d'expériences à partir de cette hypothèse permet également de trouver un grand nombre d'expériences similaires consistant à faire une injection et vérifier une des observations de respiration, mort, ou réaction à la stimulation des muscles à la suite de cette expérience. Ces solutions, bien qu'imparfaites, sont obtenues en quelques instants en limitant la profondeur de preuve (ce qui a pour principal effet de ne pas garantir leur minimalité), une recherche exhaustive étant en revanche très longue. Ce sont à la fois des résultats encourageants mais également révélateurs d'un grand nombre de problématiques.

5 Discussion

Comparativement à l'exemple du laboratoire, celui de la toxicologie de Claude Bernard soulève plus de problématiques. En plus du choix de valeurs qualitatives pour représenter le temps et les quantités, se retrouvent les problèmes de complétude de l'information, et de spécialisation de la théorie pour chacune des trois phases du cycle.

5.1 Champ de production pour le choix d'expérience

Il n'est pas encore possible de différencier les conditions sur deux champs de production différents. Les conditions intéressantes pour la recherche d'expérience seraient d'avoir entre 0 et n interventions et précisément une observation. Actuellement, définir deux champs de production revient à en définir un seul regroupant les deux langages mais perdant les conditions.

5.2 Complétude de l'information

La formulation logique de la théorie doit permettre de l'utiliser pour chacune des trois étapes du cycle indifféremment. Les informations nécessaires selon le sens de la recherche sont cependant légèrement différentes. Pour une formation d'hypothèses, formation d'expérience ou une simulation, des valeurs par défaut sont nécessaires mais ne concernent pas forcément les mêmes domaines. Cependant, SOLAR ne permet pas l'utilisation de valeurs ou négation par défaut. Certaines valeurs clés d'entrée peuvent être complétées par l'utilisation de scripts. Par exemple, pour un protocole expérimental où l'on souhaite poser un garrot, il est possible de générer l'information de l'absence de garrot à tout autre moment et autre endroit. Certaines valeurs sont plus internes au raisonnement et ne peuvent pas être tout simplement affirmées sans fausser le raisonnement. Par exemple l'activité d'un organe (le fait d'être apte à remplir ses fonctions de filtre ou d'apport nutrition-

nel), dépend de la complétude de l'information concernant soit les observations de l'organisme, soit des interventions effectuées, selon le sens de la recherche.

Selon une autre approche, il faut noter que le processus permet plus facilement d'ajouter de nouvelles règles que de corriger les existantes. Bien que le besoin de complétude de l'information pousse à écrire tous les cas possibles, il faut donc se méfier que la théorie utilisée ne devienne pas trop rigide et puisse encore évoluer. Si l'on peut compléter les hypothèses de différentes manières, il faut considérer que cela augmente d'autant le nombre d'hypothèses à traiter et potentiellement le temps nécessaire pour les évaluer. Il est également possible, sans figer les connaissances d'ajouter des prédicats comme l'activité d'un organe au champs de production. On obtient ainsi des solutions interprétables comme "si A alors B". Il est cependant nécessaire dans ce cas là d'avoir un post-traitement de l'information humain ou machine qui puisse avoir des valeurs par défaut ou des priorités.

5.3 Stratégies de recherche de couples

En fonction des moyens de temps et de disponibilité du matériel expérimental ainsi que des moyens informatiques, on peut choisir différentes stratégies : (i) chercher un couple ($\neg E \vee O$) puis vérifier s'il est candidat sinon poursuivre la recherche jusqu'à en trouver un autre ; (ii) chercher tous les couples à partir d'une hypothèse (la mieux cotée si elles sont évaluées) ; (iii) chercher tous les couples à partir de chacune des hypothèses. Il est en effet bien plus rapide de trouver une solution que de vérifier les avoir toutes trouvées.

Par ailleurs il peut également être intéressant d'envisager plusieurs manières de traiter les hypothèses pour le cycle suivant. En effet les hypothèses fournies par SOLAR sont des hypothèses minimales et le rejet de l'une d'elle ne signifie pas nécessairement le rejet de toutes celles qu'elle subsume. S'il est possible de les détailler plus précisément à partir de critères déjà identifiés, il est intéressant d'envisager différentes stratégies : (i) trouver un moyen d'explicitier chaque hypothèse rejetée pour en tirer les sous-hypothèses encore valides ; (ii) explicitier toutes les hypothèses initialement de manière à ce que toute hypothèse rejetée n'ait pas à être réétudié ; (iii) régénérer les nouvelles hypothèses à partir de la théorie et des clauses $\neg E \vee O$ déjà considérés. Si l'on considère le raisonnement étape par étape il peut être important de prendre le temps d'évaluer et de comparer l'intérêt de chaque hypothèse afin de mieux choisir l'angle d'approche pour la prochaine recherche. Si l'on considère un raisonnement plus rapide qui enchaîne plusieurs boucles, il n'est finalement pas très important de savoir quelles étaient les hypothèses à l'issue de la première boucle si elles ont été finalement rejetées ensuite. Il peut donc être intéressant de se contenter de recherche partielle, bien plus rapide pour un premier temps et de se contenter d'une recherche complète comme assertion de la validité de la dernière hypothèse.

6 Conclusion

Cet article présente une nouvelle approche de la recherche d'expérience au sein d'un apprentissage en boucle fermée, se basant sur une théorie utilisée pour les trois étapes du cycle de vie des hypothèses dans la découverte de connaissance. S'il semble nécessaire d'adapter la théorie avec des pré ou post traitements mineurs, différents pour chaque étape, la méthode se montre d'ores et déjà prometteuse. Il est possible de traiter une théorie plus ou moins complexe comprenant un aspect séquentiel et pour cela plusieurs stratégies de recherche sont envisagées. Une évaluation des expériences est proposée. Bien qu'elle doive être manipulée avec précautions, elle s'avère utile pour optimiser l'apprentissage en présence d'hypothèses équivalentes. Une attention particulière doit encore être portée sur la manière d'inclure les informations partielles ou de les compléter afin de ne pas être bloqué par une théorie trop rigide ou biaisée. L'automatisation du cycle complet d'apprentissage demande à cet égard une étude approfondie ainsi que l'utilisation de valeurs par défaut encore difficilement appréhendée. L'évaluation et le raffinement des stratégies sont également sujet à nombre d'améliorations opportunes.

Références

- [1] Gauvain Bourgne and Katsumi Inoue. Towards a model of collective knowledge discovery. In *Pre-Proceedings of AIAI'09*, July 2009.
- [2] Bernard Claude. Leçon sur les effets des substances toxiques et médicamenteuses. In *Cours de médecine du collège de France*. J.-B. Baillière et Fils, Paris, 1857.
- [3] Ross D. King *et al.* The automation of science. *Science*, 324(5923) :85–89, 2009.
- [4] Bassel Habib and Jean-Gabriel Ganascia. Using ai to reconstruct claudes bernard's empirical investigations. In *Proceedings of ICAI2008*, pages 496–501. CSREA Press, 2008.
- [5] Katsumi Inoue. Linear resolution for consequence finding. *Artif. Intell.*, 56(2-3) :301–353, 1992.
- [6] Ross D. King, Andreas Karwath, Amanda Clare, and Luc Dehaspe. Logic and the automatic acquisition of scientific knowledge : An application to functional genomics. In *Comp. Disc. of Scientific Knowledge*, pages 273–289. Springer, 2007.
- [7] Stephen Muggleton. Inverse entailment and progol. *New Generation Comput.*, 13(3&4) :245–286, 1995.
- [8] H. Nabeshima, K. Iwanuma, K. Inoue, and O. Ray. SOLAR : An automated deduction system for consequence finding. In *AI Comm.*, volume 23, pages 183–203, 2010.
- [9] Yun Peng and James A. Reggia. *Abductive inference models for diagnostic problem-solving*. Springer, New York, 1990.