

Un patron de conception pour la modélisation ontologique des paradigmes expérimentaux

J. Hilbey^{1,2}, X. Aimé^{3,2}, J. Charlet^{4,2}

¹ Sorbonne Université, Paris, France

² Laboratoire d'Informatique Médicale et d'Ingénierie des Connaissances en e-Santé, LIMICS, Paris, France

³ Cogsonomy, Nantes, France

⁴ Assistance Publique-Hôpitaux de Paris, Paris, France

jacques.hilbey@sorbonne-universite.fr

Résumé

Nous présentons un patron de conception ontologique pour la modélisation d'expériences scientifiques et d'examen menés lors d'une étude de recherche clinique. Intégrer des données hétérogènes dans un modèle ontologique commun est un défi, redoublé par l'exigence de pouvoir les explorer ultérieurement. Afin de faciliter l'élaboration des modules ontologiques dédiés, ce patron de conception s'appuie sur des invariants, est centré sur l'événement de la passation, et conserve le lien aux données originales.

Mots-clés

Patron de conception ontologique, ontologies biomédicales, recherche biomédicale.

Abstract

We present an ontology design pattern for modeling scientific experiments and examinations conducted in a clinical research study. Integrating heterogeneous data into a common ontological model is a challenge, redoubled by the requirement to be able to explore them later. In order to facilitate the development of dedicated ontological modules, this design pattern relies on invariants, is centered on the event of the test, and keeps the link to the original data.

Keywords

Ontology Design Pattern, Biomedical Ontologies, Biomedical Research.

1 Introduction

Le projet PsyCARE¹ est un projet de Recherche Hospitalo-Universitaire en santé qui vise à améliorer la détection et l'intervention précoce en cas de psychose, et à offrir des programmes thérapeutiques personnalisés. Afin d'atteindre cet objectif, le projet se propose :

- d'identifier des biomarqueurs pour améliorer le diagnostic, la détection du stade de la maladie et la prédiction du devenir fonctionnel;

- d'identifier une liste de cibles pour les stratégies de modification de la maladie;
- de fournir et de valider :
 - une application pour l'entraînement cognitif personnalisé,
 - une application centrée sur le patient facilitant la gestion des cas et l'engagement du patient,
 - un système d'aide à la décision qui guidera la stratégie thérapeutique personnalisée;
- de développer une plateforme innovante de collecte et d'intégration des données du projet adaptée à la recherche en psychiatrie et aux soins en santé mentale;
- de fournir un kit d'outils pour la diffusion des connaissances et la formation afin d'améliorer la sensibilisation et le transfert des résultats de PsyCARE à la pratique médicale.

Différentes études sont mises en œuvre dans le cadre du projet, dont la principale est multicentrique. La plateforme de collecte des données est le point d'accès unique, pour les utilisateurs finaux, aux données transmises par les producteurs de données.

Le modèle conceptuel de la plateforme de collecte des données est fourni par une ontologie modulaire dont les modules de domaines correspondent aux données hétérogènes recueillies : données cliniques, d'imagerie cérébrale, de biologie et de biologie moléculaire, d'analyse de la parole, d'évaluation motrice.

Le rôle que peuvent jouer les ontologies dans l'intégration et l'échange de données en permettant une interopérabilité sémantique est bien établi [2].

Afin de faciliter l'intégration de ces données dans les différents modules ontologiques dédiés, la conservation de métadonnées de provenance, l'exploration des données et leur réutilisabilité ultérieure, nous proposons dans cet article un patron de conception ontologique centré sur les événements de passation d'expérience applicable largement aux paradigmes expérimentaux de différentes disciplines.

1. <https://psy-care.fr/>

2 Matériel et méthodes

2.1 Les sources de données

Outils d'évaluations psychiatrique Les outils d'évaluation utilisés en psychiatrie permettent de déterminer, en l'absence de biomarqueur fiable de la pathologie, le seuil entre le normal et le pathologique. Ils prennent la forme de questionnaires ou d'autoquestionnaires, d'entretiens, de tests ou de tâches, parfois standardisés et validés (on parle alors d'échelles).

Examens d'imagerie cérébrale Des examens d'imagerie par résonance magnétique (IRM) anatomique ou fonctionnelle, d'électroencéphalographie (EEG), de tomographie par émission de positons (TEP) du cerveau, sont menés pour guider les interventions thérapeutiques.

Examens de biologie médicale Différents examens de biologie médicale sont effectués afin de permettre l'identification de biomarqueurs biologiques, là aussi pour guider les interventions thérapeutiques.

Examens de biologie moléculaire Des examens de biologie moléculaire sont mis en œuvre afin d'identifier des biomarqueurs génétiques des symptômes ou des troubles d'intérêt, des mutations génétiques constituant des prédispositions, des mécanismes étiologiques sous-jacents suggérant des interventions thérapeutiques.

Analyse de la parole Des enregistrements de sessions thérapeute-patient sont analysés d'une part dans leurs aspects prosodiques, puis après transcription dans leurs aspects syntaxiques et lexicaux par des techniques de Traitement Automatique des Langues.

Evaluation des troubles de la dextérité et des fonctions cognitivo-motrices Différentes tâches effectuées sur une tablette numérique sont proposées au sujet de l'expérimentation, mettant en jeu la précision et la rapidité des mouvements des doigts, la rotation mentale, la capacité d'effectuer des mouvements isolés des doigts en évitant des syncinésies, la temporalité et la variabilité des mouvements fins des doigts, tâches effectuées sur une tablette numérique.

2.2 Éléments de description communs

Les données que nous venons de présenter sont hétérogènes à la fois par leur contexte de production, par les modèles scientifiques qui les sous-tendent, par les usages de formatage et de transmission qui s'y appliquent, et même par le lexique développé par chaque domaine pour désigner ses objets et ses méthodes. Nous pouvons toutefois pointer les éléments communs à ces processus de production de données : **l'objet d'étude**, **la passation d'une expérience**, expérience qui obéit pour les différents objets d'étude à un même **protocole** et qui génère en premier lieu un **produit concret** à partir duquel sont effectuées des **mesures** ou des évaluations. Le protocole, antérieur à la réalisation des expériences, prévoit nécessairement un **instrument de captation** du produit concret, et implique éventuellement une **mise en condition** de l'objet d'étude ou de l'agent de passation permettant d'assurer la comparabilité des résultats

obtenus, ainsi qu'un ou des **stimulus** permettant de conditionner le phénomène étudié pour en affiner l'observation. Le tableau 1 montre comment les différents éléments communs retenus sont déclinés selon les différentes sources de données. Le terme d'« instruction » recouvre ce que nous avons appelé plus haut « mise en condition ».

Le repérage de ces éléments de description communs ne dispense pas d'une réflexion sur la manière dont ils apparaissent dans les domaines. Nous pensons notamment à la comparabilité de la granularité des examens, des séquences, des expériences, et des événements concrets qui y sont associés.

2.3 Engagement ontologique

Les modules ontologiques développés pour les différentes sources de données s'inscrivent dans une ontologie modulaire pour laquelle ont été développées antérieurement une ontologie fondationnelle (ontoPOF) et une ontologie noyau des données médicales (ontoDOME). Certains engagements ontologiques pris lors de leur élaboration permettent d'explicitier certains aspects du patron de conception ontologique présenté dans cet article.

ontoPOF est une ontologie fondationnelle qui préserve une forte compatibilité avec les ontologies fondationnelles endurantistes comme BFO ou DOLCE, mais :

- ouvre des possibilités de représentation de la dynamique temporelle des entités définies par l'espace qu'elles occupent [6] (les « objets » en un sens large, incluant les êtres vivants) en les reliant systématiquement à leur existence entière, aux événements auxquels elles participent et aux événements dont elles sont le lieu ;
- spécifie la relation de participation à un événement pour indiquer le rôle tenu ;
- considère les projets, entités intentionnelles, comme des entités de premier plan et modélise leur réalisation dans un ou plusieurs événements.

D'une manière générale, cette ontologie fondationnelle est centrée sur les événements considérés comme les seules entités primitives concrètes, afin de permettre la représentation de la dynamique temporelle (l'évolution) des entités présentes dans l'ontologie.

ontoDOME est une ontologie noyau pour le domaine de la santé qui modélise les connaissances telles qu'elles sont échangées ou décrites dans des documents médicaux, plutôt que telles qu'elles existeraient dans l'esprit des experts médicaux. Ce choix :

- repose sur une vision des ontologies comme des artefacts numériques qui étendent la cognition humaine, tant pour les producteurs de données – qui peuvent stocker de grandes quantités de données dont la cohérence est assurée par le modèle –, que pour les utilisateurs finaux – qui peuvent explorer ces mêmes données sans connaître le modèle de stockage des données sous-jacent ;
- favorise la traçabilité des données et, plus généralement, le respect des principes FAIR (les docu-

Domaine	Psychométrie	Imagerie	Biologie	Biologie moléculaire	Analyse du discours	Dextérité
Expérience (passation)	Questionnaire, entretien, test	Séquence IRM, EEG, TEP	Prélèvement en laboratoire	Prélèvement en laboratoire	Enregistrement	Tâche de motricité
Stimulus	Question, dessin, etc.	Son, image, etc.	NA	NA	Question	Images, sons
Outil de captation	Papier et crayon	Appareil IRM, EEG, TEP	Kit de prélèvement	Kit de prélèvement	Appareil enregistreur	Tablette numérique
Instruction	au sujet, à l'agent de passation	Paramétrage, agent de contraste	au sujet, de prélèvement	NA	NA	au sujet
Produit direct	Réponse	Jeu d'images	Échantillon	Échantillon	Fichier audio	Gestes
Mesure	Scores	Volumes, régions d'intérêt	Valeurs, comparaisons à des seuils	Id. de gènes, de variants, de <i>pathways</i>	Valeurs de variables	Valeurs de variables

TABLE 1 – Éléments communs selon les différentes sources de données de PsyCARE

ments sont référencés et accessibles via un référentiel commun qui est validé sémantiquement et partagé par les experts médicaux).

Ces engagements ontologiques nous amènent, dans l'élaboration du patron de conception ontologique, à porter une attention particulière à :

- la conservation d'un parallélisme entre le projet (le protocole de l'expérience) et l'événement qui le réalise (la passation de l'expérience), afin de pouvoir comparer les deux ;
- l'introduction des données entre la passation de l'expérience et les mesures auxquelles elle donne lieu : ce sont les informations effectivement transmises entre les différents acteurs ; elles présentent différents niveaux de granularité, des données d'une étude aux données relatives à un item d'une collecte de données (reflétées dans la granularité des événements : étude, visite, examen, collecte de données, étape de collecte de données).

2.4 Les patrons de conception ontologique

Un patron de conception ontologique est une modélisation qui peut servir pour résoudre un problème de conception ontologique qui se pose de façon récurrente [7]. Dégager un tel patron repose donc sur l'observation d'invariants dans les données, les objets, les processus, les relations.

Les patrons de conception ontologique (ou *Ontology Design Patterns* – OP) peuvent être de plusieurs types [4] :

- les *Structural OPs*, qui subsument (i) les *Logical OPs* résolvant un problème d'expressivité et (ii) les *Architectural OPs* contraignant la constitution générale de l'ontologie ;
- les *Reasoning OPs* qui orientent le raisonnement du moteur d'inférence ;
- les *Correspondence OPs*, qui subsument (i) les

Reengineering OPs transformant un modèle source en modèle ontologique et (ii) les *Mapping Ops* pour exprimer des correspondances ;

- les *Presentation OPs* pour les conventions de nommage et les schémas d'annotation ;
- les *Lexico-syntactic OPs* qui associent des formes linguistiques à une signification ;
- les *Content OPs* qui proposent des patrons pour le contenu d'un domaine particulier.

Cette dernière catégorie correspond très précisément à ce que nous proposons ici.

2.5 État de l'art

Une recherche par mots-clés sur le site web de l'*Association for Ontology Design & Patterns* (ODPA)² ne donne pas de résultat pour le sujet que nous traitons. En revanche, quelques ontologies proposent des modélisations d'expériences scientifiques ou d'examen cliniques.

EXPO est une ontologie s'appuyant sur une description formelle des expériences scientifiques afin de les annoter [9]. Elle utilise SUMO comme ontologie fondationnelle et entend couvrir tout le champ de la science expérimentale, en termes de types d'hypothèse, de modèle, d'expérience, de variable, de résultats. Elle se présente comme une ontologie de niveau intermédiaire entre SUMO et des ontologies de domaine consacrées à un champ d'étude particulier.

Sa finalité est donc en premier lieu la caractérisation d'expériences scientifiques, ce qui permet de les situer méthodologiquement dans le champ de la science. En ce sens, cette ontologie ne répond pas à notre cas d'usage.

CogPo est une ontologie qui entend décrire les paradigmes de psychologie cognitive [10]. On y trouve la plupart des éléments avancés dans la section 2.2 : instructions, stimulus, paradigme, condition (qui correspond à ce que nous ap-

2. <http://ontologydesignpatterns.org/>

pelons ici « protocole d'expérience »). Comme pour EXPO, l'enjeu est plus une caractérisation d'un paradigme dans un champ scientifique qu'une modélisation d'une expérimentation en action, qui génère des données. Elle est utilisée par l'*Ontology of Experimental Variables and Values* (OOEVV) pour modéliser les variables d'IRM fonctionnelle [3]. L'ontologie légère OOEVV, qui entend modéliser les variables et leurs valeurs et pouvoir se raccorder aux ontologies de l'OBO Foundry, n'a pas connu de développement dans les autres domaines qui nous intéressent, ni après 2012.

Ontology for Biomedical Investigations (OBI) est une ontologie des études cliniques et biomédicales [1] très détaillée (plus de 4 000 classes). Elle est issue de la *Functional Genomics Investigation Ontology* (FuGO, qu'EXPO présentait comme une ontologie de domaine qu'elle se proposait de subsumer), se place sous l'ontologie fondationnelle *Basic Formal Ontology* (BFO) et reprend des classes de nombreuses ontologies ressortissant de l'OBO Foundry, notamment l'*Ontology for General Medical Science* (OGMS) pour ce qui concerne les aspects médicaux (phénotype, maladie, diagnostic, traitement) et de l'*Information Artifact Ontology* (IAO) pour ce qui concerne les objets informationnels. L'objectif d'OBI étant de fournir un modèle ontologique qu'une étude biomédicale viendra instancier, elle répond déjà à de nombreux cas d'usage et est appelée à croître pour en embrasser plus.

En proposant un patron de conception ontologique facilitant l'élaboration de modules selon les domaines, nous opérons un choix différent : nous proposons une structure minimale permettant d'intégrer les données et de les explorer, et laissons aux modules de domaines une modélisation plus poussée du domaine. D'autre part, les niveaux de granularité des événements de l'étude, des données qu'ils génèrent et des éventuels protocoles correspondants, ne sont que marginalement pris en considération ; cette critique concerne toutefois plutôt IAO, voire BFO, qu'OBI en propre.

Hors du domaine biomédical, l'ontologie *Semantic Sensor Network* [5] (SSN) propose une modélisation très aboutie recoupant nos préoccupations, même si par construction elle est centrée sur les dispositifs d'acquisition (ou d'actionnement) quand nous nous centrons sur la connaissance acquise sur le sujet étudié.

3 Résultats

3.1 Un patron de conception ontologique pour les paradigmes expérimentaux

Un paradigme expérimental peut être considéré comme étant dans une relation d'abstraction par généralisation à différentes conditions expérimentales, qui en seraient les spécifications. Cette conception amènerait à une modélisation des conditions comme autant de sous-classes d'un paradigme expérimental. En prenant en compte la pratique expérimentale effective, qui mêle au sein d'une même session (unité temporelle) la passation de différentes conditions expérimentales obéissant au même paradigme, nous

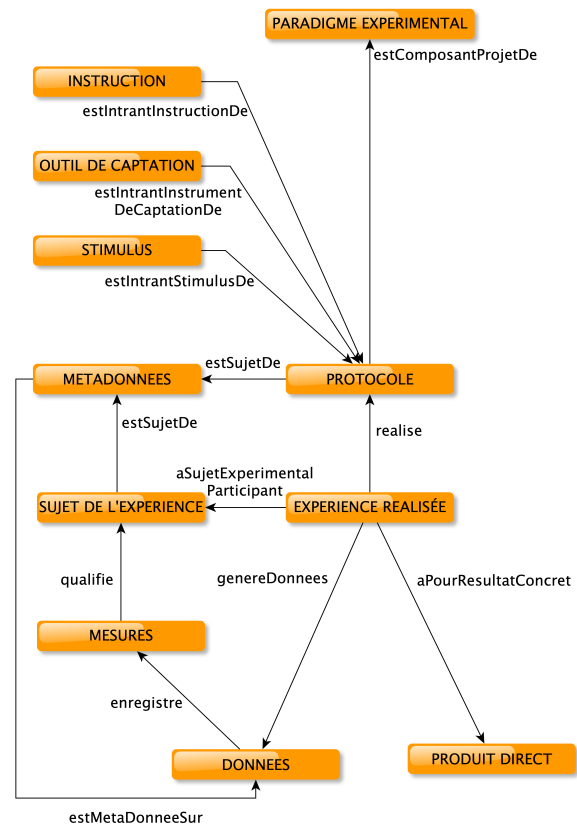


FIGURE 1 – Un patron de conception d'ontologie pour les paradigmes expérimentaux.

choisissons de considérer une relation mérotopologique de composition entre le paradigme et les conditions, reflétant la relation mérotopologique entre les événements (temps de la session, qui a pour parties les temps des différentes conditions).

La figure 1 présente les résultats au niveau de la condition. C'est à ce niveau que sont précisés, pour le protocole de la condition, quels sont les stimulus, instruction et outil de captation prévus en tant qu'intrants – le protocole est un projet qui est réalisé lors de chaque passation de l'expérience par un sujet.

Le patron de conception tient essentiellement dans les relations (*Object Properties*) qui sont indiquées. Les éléments de description communs que nous avons dégagés dans la section 2.2 ne doivent pas être conçus comme des classes nécessairement présentes dans l'ontologie.

Si certains éléments (nous nous plaçons ici au niveau des instances) présentent une proximité ontologique forte, comme les sujets, les événements de passation, les protocoles, ce qui peut amener à prévoir des classes (éventuellement des classes définies) pour les représenter dans la partie taxonomique de l'ontologie, d'autres peuvent recouvrir une forte diversité ontologique, comme les stimulus, les produits directs, les outils de captation ou les instructions. Qui plus est, ces derniers éléments peuvent selon les contextes apparaître sous différents aspects (une portion de sang prélevé peut faire l'objet d'analyses ou d'un don de sang ; un

son servant de stimulus peut entrer dans une composition musicale) et leur position dans la taxonomie dépendra de leur nature intrinsèque, mais c'est une relation à d'autres entités qui permettra d'indiquer leur fonction ou leur rôle dans le contexte qui nous intéresse. D'autre part, la position des éléments de description communs dans la taxonomie peut tenir à l'engagement ontologique pris en amont, comme nous l'avons montré dans la section 2.3.

Aux éléments communs spécifiés plus haut s'ajoutent les métadonnées, qui portent sur le protocole et le sujet de l'expérience, ce qui permet d'établir un lien plus direct entre les données et les informations importantes de leurs conditions de production : le sujet et le protocole spécifique de la condition expérimentale.

Certaines relations peuvent sembler redondantes. Elles permettent de raccourcir le chemin dans le graphe de connaissance, selon le mode d'exploration souhaité. Si l'on se centre sur le sujet de l'expérience, on peut accéder rapidement à l'étude dans laquelle l'expérience a été réalisée et aux mesures qui le qualifient, ou inscrire l'événement de la passation dans une chronologie des événements connus de la vie du patient ; si l'on se centre sur les données, on peut accéder rapidement à celles-ci et à leurs métadonnées ; si l'on se centre enfin sur l'événement de la passation de l'expérience (qui dans le graphe présenté est le nœud qui a la plus grande centralité de proximité aux autres nœuds), on peut l'inscrire dans une chronologie des événements de l'étude.

3.2 Application à la dextérité

Nous présentons dans la figure 2 une application de notre patron de conception ontologique au module consacré à la dextérité et à la psychomotricité :

- le paradigme général est un paradigme de reconnaissance des doigts (subdivisé en conditions Inverse, Miroir et Transversal) ;
- l'événement considéré est la passation d'une expérience de reconnaissance des doigts (*finger recognition*) en condition Inverse ;
- il obéit à un protocole qui met en jeu une tablette numérique comme instrument de captation des réactions psychomotrices du sujet et une image de main inversée comme stimulus (le patient est invité à poser le doigt qui est indiqué sur la représentation inversée d'une main) ;
- différentes mesures sont effectuées : le temps de réaction, le taux de réussite, le taux d'échec, et le taux de coactivation – qui mesure si d'autres doigts bougent en même temps que le doigt ciblé ;
- l'instrument de captation est conçu pour traduire immédiatement en mesures le produit direct (le geste du patient), qui n'est donc pas conservé ;
- aucune instruction n'est mentionnée dans le protocole, qui ne comporte donc pas ce type d'intrant.

3.3 Utilisation et validation

Ce patron de conception a été utilisé sur les différents modules de domaines. Il a permis d'orienter la modélisation en

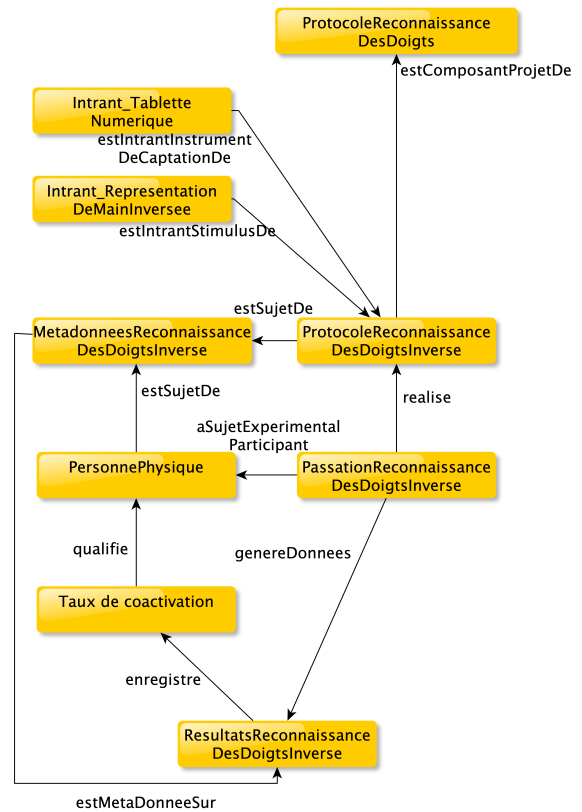


FIGURE 2 – Application aux données de dextérité.

poussant à identifier dans les différentes sources de données les éléments à intégrer dans les ontologies dédiées. L'élaboration ainsi facilitée des modules de domaine constitue une validation interne.

Il a été déposé sur le site de l'ODPA³ afin de pouvoir être revu et critiqué par la communauté autour des *Ontology Design Patterns*.

Le module consacré à la dextérité, accompagné de requêtes SPARQL illustrant les possibilités d'exploration des données, est disponible⁴.

4 Discussion

Selon les sources de données, le patron de conception que nous présentons doit être adapté. Par exemple :

1. dans le module des données relatives à la dextérité, certaines conditions sont passées dans une même séquence et les données qui en résultent représentent parfois une moyenne, parfois une soustraction entre résultats obtenus dans chaque condition ; dans ces cas, les données ne peuvent être reliées à la passation réalisant un protocole, mais doivent être reliées à la passation réalisant un paradigme (événement dont la passation réalisant un protocole est un épisode),

3. <http://ontologydesignpatterns.org/wiki/Submissions:ExperimentalParadigmData>

4. <https://framagit.org/jacqueshilbey/ontodext-op>

2. dans le module des données d'analyse du discours, le produit concret de la passation est un fichier audio, qui fait ensuite l'objet d'une transcription ; il serait envisageable de modéliser plus avant ce processus, mais le choix effectué a été de conserver l'enregistrement et sa transcription comme deux produits concrets de la passation et de fusionner les données produites.

D'autre part, la modélisation que nous avons présentée dans la figure 1 se situe au niveau de l'expérience, considérée comme la plus petite entité, parmi les événements, présentant une unité (elle n'est pas composée, même si elle peut avoir des parties). Aux niveaux de granularité plus élevés, on retrouve la relation *realise* entre l'événement de passation d'un examen (correspondant au niveau du paradigme) et le protocole plus générique du paradigme, ainsi que la relation *genereDonnees* entre ce même événement et les résultats considérés globalement de l'examen (ainsi que les relations méréotopologiques par type d'entités – événements, protocoles, données – entre ces différents niveaux). L'utilisation de ce patron de conception n'exonère pas d'une identification précise de ces différents niveaux de granularité selon les différentes sources de données. Cette identification, comme nous l'avons expliqué dans la section 2.3, se fonde sur les événements, en recherchant ce qui reste invariant (unité de sujet de l'expérience, unité de lieu et de temps, unité de domaine d'exploration, unité de paradigme, unité de condition).

La traçabilité des flux de données et des traitements qui leur ont été appliqués, non évoquée ici, est assurée par l'importation d'une partie de l'ontologie BMS-LM [8] développée par l'industriel assurant la mise en place de la plateforme (Fealinx), et s'appuie sur PROV-O.

En termes d'exploration du graphe de connaissance, ce qui est privilégié est :

- l'analyse exploratoire des données, à partir des variables et du sujet qu'elles qualifient ;
- l'examen des données relatives à un cas ;
- la reconstitution de la chronologie des événements d'une étude.

5 Conclusion

Le patron de conception que nous présentons s'appuie sur la structure commune fournie par la méthodologie scientifique et sur l'importance des données dans la science contemporaine pour surmonter le défi que représente l'intégration de données hétérogènes. Il ne constitue pas une solution clé en main au sens où il oblige à se poser des questions concernant la granularité des événements impliqués, la place donnée aux produits concrets, les besoins de métadonnées. Une fois ces questions résolues, il permet un cadre unifié pour intégrer et explorer les données tout en conservant un souci de traçabilité de celles-ci. Ce cadre est conçu comme compréhensif : tous les éléments présentés ne sont pas nécessairement instanciés (voir le tableau 1 et la section 3.2), selon les sources de données et selon les cas d'usage.

Il est assez indépendant de l'ontologie de haut niveau sous laquelle on se place, même s'il suppose qu'en amont des ontologies de domaine y recourant, les ontologies de plus haut niveau permettent de modéliser des objets, des projets, des événements, des propriétés, des objets informationnels. Autant que possible, les éléments sont alignés à des vocabulaires ou à des terminologies de référence (LOINC pour les examens de biologie, NDA pour les échelles en psychiatrie).

Remerciements

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du Programme d'Investissements d'Avenir portant la référence PsyCARE ANR-18-RHUS-0014.

Références

- [1] A. Bandrowski, R. Brinkman, M. Brochhausen, M.H. Brush, B. Bug, M.C. Chibucos, et al., The Ontology for Biomedical Investigations. *PLoS ONE*, Vol. 11, 2016.
- [2] O. Bodenreider, Biomedical Ontologies in Action : Role in Knowledge Management, Data Integration and Decision Support, *Yearb Med Inform.*, pp. 67-79, 2008.
- [3] G.A.P.C. Burns, J.A. Turner, Modeling functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI) experimental variables in the Ontology of Experimental Variables and Values (OoEVV), *NeuroImage*, Vol. 82, pp. 662-670, 2013.
- [4] A. Gangemi, V. Presutti, Ontology Design Patterns, in *Handbook on ontologies*, pp. 221-243, 2009.
- [5] A. Haller, K. Janowicz, S. Cox, M. Lefrançois, K. Taylor, D. Phuoc, J. Lieberman, R. García Castro, R. Atkinson, C. Stadler, Claus, The Modular SSN Ontology : A Joint W3C and OGC Standard Specifying the Semantics of Sensors, Observations, Sampling, and Actuation. *Semantic Web*, Vol. 10, 2018.
- [6] J. Hilbey, X. Aimé, J. Charlet, Représentation des connaissances médicales temporelles au moyen d'ontologies, in *33es Journées Francophones d'Ingénierie des Connaissances, IC 2022*, pp. 26-42, 2022.
- [7] P. Hitzler, A. Gangemi, K. Janowicz, A.A. Krisnadhi, V. Presutti (Eds.), *Studies on the Semantic Web*, Vol. 25, 2016.
- [8] A. Raboudi, M. Allanic, D. Balvay, P.-Y. Hervé, T. Viel, T. Yoganathan, A. Certain, J. Hilbey, J. Charlet, A. Duropt, P. Boutinaud, B. Eynard, B. Tavitian, The BMS-LM ontology for biomedical data reporting throughout the lifecycle of a research study : From data model to ontology, *J Biomed Inform.*, Vol. 127, 2022.
- [9] L.N. Soldatova, R.D. King, An ontology of scientific experiments *Journal of The Royal Society Interface*, Vol. 3, pp. 795-803, 2006.
- [10] J.A. Turner, A.R. Laird, The Cognitive Paradigm Ontology : Design and Application, *Neuroinformatics*, pp. 57-66, 2012.