APA4CAD : une ontologie pour structurer l'activité physique adaptée en post-rééducation coronarienne

Morgane Molina[1], Mouna Kamel[1], Fabienne Durand[1]

[1] Université de Perrpignan, ESPACE-DEV

Février, 2026

Résumé

Les maladies chroniques constituent un défi majeur pour les systèmes de santé du fait de leur prévalence croissante et de leur impact durable sur la qualité de vie, les maladies cardiovasculaires - en particulier les pathologies coronariennes - étant parmi les plus répandues. Pour diminuer le risque de récidive ou de complication de ces pathologies, une solution est l'adhésion à l'activité physique sur le long terme. Malheureusement, des études montrent que suite à la phase de réadaptation cardiaque, la pratique d'activité physique demeure insuffisante voir cesse complètement. Plusieurs facteurs peuvent expliquer un tel état de fait, comme l'hétérogénéité des prescriptions de pratiques ou encore les freins bio-psycho-sociaux liés au patient. Ce travail a donc pour objectif de développer APA4CAD, une ontologie dédiée à la représentation des modalités d'activité physique adaptée aux patients, afin de mieux organiser et individualiser le suivi des patients, d'homogénéiser les pratiques de prescription entre professionnels, d'assurer la traçabilité des recommandations effectuées au cours du suivi du patient, de fournir un cadre formel permettant de vérifier la cohérence d'une prescription au regard du profil clinique du patient. APA4CAD est disponible à https://github.com/Morgane-Ontology/APA4CAD.

Mots-clés

Représentation des connaissances ; Ontologie ; Maladie coronarienne ; Réadaptation cardiaque ; Activité physique ; Guide prescription d'exercice ; Post-réadaptation.

Abstract

Chronic diseases represent a major challenge for healthcare systems due to their increasing prevalence and their long-term impact on quality of life, with cardiovascular diseases particularly coronary artery diseases being among the most widespread. To reduce the risk of recurrence or complications associated with these conditions, long-term adherence to physical activity is recommended. However, studies show that following the cardiac rehabilitation phase, physical activity practice often remains insufficient or may even cease completely. Several factors may explain this situation, including heterogeneity in exercise prescription practices and the presence of bio-psycho-social barriers related to the patient.

The objective of this work is therefore to develop APA4CAD, an ontology dedicated to the representation of adapted physical activity modalities for patients with coronary artery disease. The aim is to better structure and individualize patient follow-up, to harmonize prescription practices among professionals, to ensure traceability of recommendations throughout patient monitoring, and to provide a formal framework enabling verification of the coherence of a prescription with respect to the patient's clinical profile. APA4CAD is available at https://github.com/Morgane-Ontology/APA4CAD.

Keywords

Keywords : Knowledge Representation ; Ontology ; Coronary Artery Disease ; Cardiac Rehabilitation ; Physical Activity ; Exercise Prescription Guide ; Post-Rehabilitation.

1 Introduction

Selon l'Organisation mondiale de la Santé, les maladies cardiovasculaires (MCV) constituent la première cause de mortalité dans le monde, responsables de 19,8 millions de décès annuels[1]. Parmi elles, en France, la maladie coronarienne (MC) représente la forme la plus fréquente et la plus létale, en raison de son implication directe dans la survenue de l'infarctus du myocarde, de l'insuffisance cardiaque ischémique et des événements coronariens récurrents [2]. De plus, le vieillissement de la population et l'augmentation de la prévalence des facteurs de risque cardiovasculaires majeurs tels que le diabète, l'obésité et la sédentarité contribuent à la progression continue de cette pathologie à l'échelle mondiale. Aujourd'hui, la prise en charge de la maladie coronarienne s'inscrit dans une stratégie de prévention structurée en trois niveaux. La prévention primaire vise à éviter l'apparition de l'athérosclérose chez les sujets à risque, par la modification du mode de vie et la surveillance métabolique. La prévention secondaire cible les patients ayant présenté un événement coronarien ou bénéficié d'une revascularisation (angioplastie, pontage), en cherchant à limiter les récidives. Enfin, la prévention tertiaire concerne les patients coronariens chroniques et vise à réduire les incapacités fonctionnelles, prévenir les complications et optimiser la qualité de vie [3]. Dans ce cadre, l'activité physique adaptée (APA) constitue un levier central des approches préventives secondaire et tertiaire : elle permet

de réduire les hospitalisations évitables, d'améliorer la qualité de vie et de contribuer à la soutenabilité des systèmes de soins [4][5]. Cette logique préventive s'articule avec le dispositif de réadaptation cardiaque, organisé en trois phases successives [6]. La phase I , hospitalière, est centrée sur la stabilisation clinique et la mobilisation précoce. La phase II, supervisée en centre spécialisé, relève principalement de la prévention secondaire et vise à restaurer la capacité fonctionnelle tout en renforçant l'éducation thérapeutique [7]. La phase III, correspondant à la prévention tertiaire, repose sur la poursuite de l'APA en milieu de vie réel, avec pour objectif le maintien de l'autonomie, la réduction des réhospitalisations et la pérennisation des bénéfices cardiovasculaires [8]. Malgré ses bénéfices documentés (amélioration de la qualité de vie, diminution du risque de récidive et réduction des coûts de santé [9][10] la phase III demeure le maillon le plus fragile du parcours. Le taux d'abandon y est élevé et l'adhésion à long terme aux recommandations reste limitée [11][12]. Cette désaffiliation s'explique par un ensemble de freins physiques, psychologiques, sociaux ou environnementaux [13], mais aussi par les limites structurelles du système actuel : prescriptions incomplètes ou génériques transmises sous forme de protocoles papier, absence de standardisation interprofessionnelle qui nuit à la traçabilité, à la reproductibilité et à la coordination des prises en charge [14], pratiques [15].

Ces constats soulignent la nécessité d'un cadre formel permettant d'harmoniser, de personnaliser et de tracer les prescriptions d'APA en phase III. Les ontologies, en tant que modèles de représentation des connaissances, constituent une réponse pertinente à cette problématique [16][17]. En définissant explicitement les concepts, les propriétés et les relations logiques du domaine, une ontologie permet d'assurer la cohérence, la traçabilité et l'interopérabilité avec les systèmes d'information de santé et les professionnels du domaine.

Ce travail a donc pour objectif de développer APA4CAD, une ontologie dédiée à la représentation des modalités d'APA, qui tient compte des contraintes rencontrées par les patients dans leur quotidien. Au delà de permettre aux professionnels de santé de (i) mieux organiser et individualiser le suivi des patients en phase III, cette ontologie permettra également (ii) d'homogénéiser les pratiques de prescription entre professionnels, (iii) d'assurer la traçabilité des recommandations effectuées au cours du suivi du patient, (iv) de fournir un cadre formel permettant de vérifier la cohérence d'une prescription au regard du profil clinique du patient.

La suite de l'article est organisée comme suit. La section 2 présente les ontologies et standards existants relatifs à l'activité physique dans le cadre de la réadaptation cardiaque. La section 3 décrit la mise en œuvre de la méthodologie METHONTOLOGY pour la construction de APA4CAD. Les résultats et les limites sont discutés en section 4, avant de conclure et de présenter les perspectives en section 5.

2 Travaux connexes

Dans le domaine de l'activité physique et de la réadaptation cardiaque, plusieurs ontologies ont été proposées afin de structurer des données hétérogènes et de soutenir la personnalisation des interventions. Toutefois, ces travaux se concentrent principalement sur la déclaration d'AP, les déterminants comportementaux ou les systèmes de recommandation génériques, sans proposer une formalisation détaillée des modalités d'exercice spécifiquement adaptées aux patients coronariens en phase post-réadaptation.

L'ontologie PACO a été développée pour améliorer l'interopérabilité des données d'activité physique issues de questionnaires et d'auto-déclarations [18]. Elle permet notamment de classer automatiquement les niveaux d'activité à l'aide d'un raisonneur. Cependant, PACO ne modélise ni les dimensions cliniques propres à la réadaptation cardiaque, ni les modalités détaillées de prescription (intensité, durée, fréquence, progression), ni les limitations individuelles susceptibles d'influencer la pratique.

L'ontologie OPTIMAL propose une structuration des déterminants de l'adhésion à l'activité physique, en mettant l'accent sur les facteurs motivationnels et comportementaux [19]. Cette approche est pertinente pour comprendre le maintien de la pratique, mais elle ne décrit pas les caractéristiques précises des exercices à prescrire dans un contexte clinique.

L'ontologie COPPER a introduit un cadre permettant de générer des recommandations contextualisées d'activité physique en intégrant des dimensions environnementales et comportementales [20]. Bien que plus avancée dans la personnalisation, elle demeure généraliste et ne cible pas spécifiquement les patients coronariens en phase post-réadaptation, ni la formalisation détaillée des modalités d'APA.

Le modèle OntoRecoModel illustre une autre orientation en associant modélisation ontologique et apprentissage automatique pour développer des systèmes d'e-coaching personnalisés [21]. Toutefois, ce modèle est davantage orienté vers la recommandation automatisée que vers la formalisation clinique structurée des prescriptions d'exercice. Par ailleurs, des standards internationaux tels que SNOMED CT et FHIR facilitent respectivement la normalisation terminologique et l'échange de données cliniques au sein des systèmes d'information de santé [22][23]. Néanmoins, ces référentiels ne proposent pas de représentation fine des modalités d'exercice (intensité, durée, fréquence, progression), ni des interactions entre limitations fonctionnelles, contre-indications et types d'activité physique dans le contexte spécifique de la réadaptation cardiaque. Ainsi, bien que ces travaux constituent des contributions majeures pour la structuration des connaissances en activité physique et en santé numérique, aucun ne propose à ce jour une ontologie dédiée à la formalisation détaillée des modalités d'APA pour les patients coronariens en phase III, intégrant simultanément les paramètres d'exercice, les profils cliniques, les limitations individuelles et les contraintes contextuelles

[24]. L'ontologie APA4CAD vise précisément à combler cette lacune.

3 Méthodologie de conception

L'objectif de ce travail étant de construire une ontologie « from scratch », nous avons choisi de nous appuyer sur la méthodologie METHONTOLOGY [25] qui décrit la démarche de façon opérationnelle et détaillée, plutôt que sur le scénario 1 de la méthodologie NeOn [26] qui décrit plus une situation de projet. Toutefois nous nous réservons la possibilité de faire évoluer cette ontologie en nous appuyant entre autres sur les scenarios 8 et 7 de NeOn pour une construction plus modulaire et un alignement avec des ontologies complémentaires du domaine, dans le but d'améliorer l'interopérabilité et l'intégration avec d'autres sources de connaissances.

3.1 Spécification

La phase de spécification vise à définir le cadre conceptuel de l'ontologie APA4CAD en précisant son objectif, sa portée, ses utilisateurs cibles, les sources de connaissances mobilisées ainsi que les questions de compétence (competency questions ou CQs) destinées à guider la modélisation. Cette étape a donc abouti à la rédaction d'un document ORSD (Ontology Requirements Specification Document), garantissant la traçabilité entre les besoins du domaine et les choix de modélisation effectués par la suite.

3.1.1 Objectif et portée

L'objectif principal d'APA4CAD est de formaliser les connaissances relatives à la prescription d'APA en phase III de réadaptation cardiaque afin de : (i) individualiser le suivi du patient (ii) homogénéiser les pratiques de prescription entre professionnels, (iii) assurer la traçabilité des recommandations effectuées au cours du suivi du patient, (iv) fournir un cadre formel permettant de vérifier la cohérence d'une prescription au regard du profil clinique du patient.

3.1.2 Sources de connaissances et CQs

L'ontologie APA4CAD a été construite à partir de trois sources complémentaires mobilisées de manière itérative tout au long du processus de conception. Premièrement, les recommandations cliniques internationales (Organisation mondiale de la santé, Haute Autorité de Santé, Société européenne de cardiologie) ont servi de cadre de référence pour définir les principes généraux de prescription d'APA après un événement coronarien. Deuxièmement, la littérature scientifique en sciences du sport et en réadaptation cardiovasculaire, ainsi que les résultats publiés de notre étude Delphi sur les freins à l'activité physique en phase post-réadaptation cardiaque [27], ont permis d'identifier les déterminants de l'adhésion, les facteurs limitants majeurs et les critères de progression pertinents pour les patients coronariens. Troisièmement, la modélisation a été éclairée par les retours de terrain issus de l'expérience professionnelle de l'une des auteures en tant qu'enseignante en APA [27]. Cette triangulation entre recommandations, savoirs scientifiques et expertise clinique a permis d'assurer la cohérence du modèle et la pertinence des concepts retenus. Par ailleurs et afin de garantir l'adéquation de l'ontologie aux besoins réels du domaine, un ensemble de CQs a été défini en amont de la conceptualisation (Table 1). La majorité de ces CQs relevait du niveau conceptuel (CQs1–8), tandis que certaines concernaient le niveau des instances (CQs9) voir lien GitHub : https://github.com/Morgane-Ontology/APA4CAD-SPARQL. Ces questions permettent de vérifier que le modèle est capable de représenter des situations cliniques concrètes, telles que l'identification des activités compatibles avec un profil patient donné, l'exclusion des activités contre-indiquées, la proposition d'adaptations en cas de limitations fonctionnelles ou contextuelles, ainsi que la traçabilité des choix effectués dans le cadre du suivi.

TABLE 1 – Competency Questions guidant la modélisation de l'ontologie APA4CAD.

CQ	Competency Question
CQ1	Quelles sont les modalités d'APA (fréquence, intensité) pour une activité de renforcement musculaire ?
CQ2	Quelles activités physiques sont interdites dans le cadre d'une cardiopathie inflammatoire ?
CQ3	Quelles activités physiques sont recommandées pour un angor stable ?
CQ4	Quels leviers proposer à un patient ne disposant pas d'un gymnase près de chez lui ?
CQ5	Quelles contre-indications d'activité physique sont associées à un syndrome coronarien aigu chez une patiente présentant également une hypertension artérielle et un stent ?
CQ6	Quels équipements sont nécessaires pour réaliser un exercice d'abduction de la jambe ?
CQ7	Quelles activités physiques nécessitent une adaptation dans le cadre de la Coronaropathie fonctionnelle ?
CQ8	Quels sont les objectifs associés aux exercices d'étirement ?
CQ9	Quels exercices physiques ont été prescrits à X ?

3.1.3 ORDS

Conformément à la méthodologie Methontology, un document ORSD (Ontology Requirements Specification Document) a été élaboré afin de formaliser les exigences du domaine, les profils d'utilisateurs, les usages attendus de l'ontologie, ainsi que les contraintes fonctionnelles liées à la prescription d'activité physique adaptée en phase post-réadaptation cardiaque (Table 2). Cet ORSD assure la traçabilité entre les besoins identifiés lors de la spécification et les choix de modélisation effectués lors de la conceptualisation.

3.2 Conceptualisation

Une vue d'ensemble du processus de conceptualisation adopté dans ce travail est présentée Figure 1, montrant que APA4CAD s'appuie principalement sur les concepts `:Pathologie`, `:ActivitePhysique`, `:Patient` et `:Prescription`. D'autres concepts comme :Frein ou :Levier permettent également d'individualiser la prescription. APA4CAD décrit également la hiérarchie des pathologies coronariennes (`:AngorStable rdfs:subClassOf :PathologieCoronarienne`, `:PathologieCoronarienne rdfs:subClassOf`

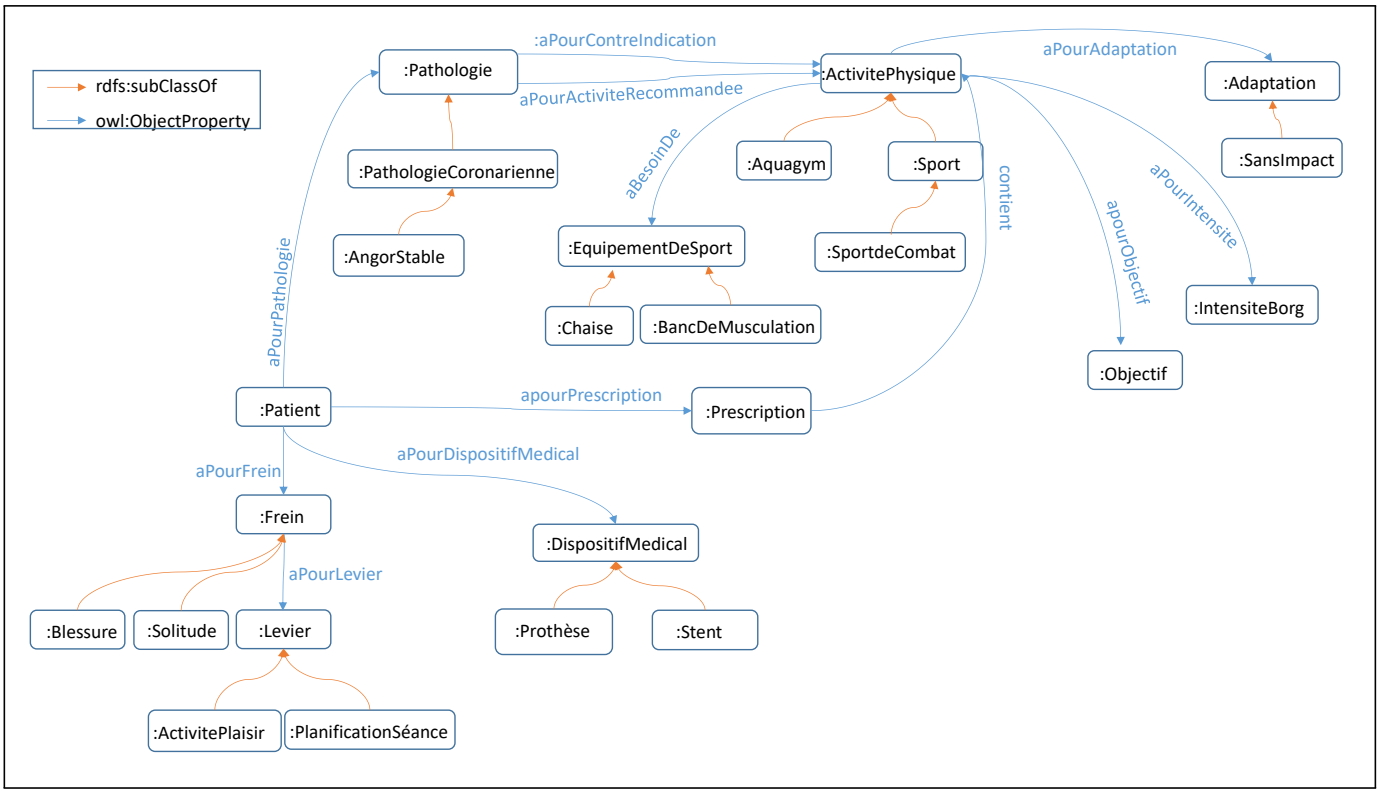

FIGURE 1 – APA4CAD : schéma conceptuel.

`:Pathologie`, etc.), ainsi que certaines pathologies non coronariennes qui impacteraient la pratique de certaines activités physiques (e.g. `:Lombalgie`). À chaque pathologie sont associées les activités physiques recommandées et contre-indiquées par les relations `:aPourActiviteRecommandee` et `:aPourContreIndication` entre les concepts `:Pathologie` et `:ActivitePhysique`. Les adaptations pouvant être apportées aux activités physiques comme la montée progressive en intensité (`:MonteeProgressiveIntensite`) ou l'absence d'impact (`:SansImpact`) dans le cadre d'une pathologie, sont exprimées par la relation `:aPourAdaptation` entre `:ActivitePhysique` et `:Adaptation`. Les équipements nécessaires à la pratique d'un exercice physique comme une chaise (`:Chaise`) ou un banc de musculation (`:BancDeMusculation`) sont décrits par la relation `:aBesoinDe` entre les concepts `:ActivitePhysique` et `:EquipementDeSport`. Chaque activité physique est associée à des objectifs (`:ActivitePhysique :aPourObjectif :Objectif`) comme l'amélioration de la capacité cardio-respiratoire (`:AmeliorationCapaciteCardiorespiratoire`), sous-concept de `:Objectif`, ou à une intensité exprimée selon l'échelle de Borg (`:aPourIntensite :IntensiteBorg`). APA4CAD décrit également les freins (`:Frein`) environnementaux, physiques, psychologiques, sociaux, situationnels et motivationnels que peuvent rencontrer les patients afin d'adapter l'activité physique à leur environnement, ainsi que les leviers (`:Levier`) susceptibles d'apporter une solution à ces freins (`:Frein :aPourLevier :Levier`).

Le patient `:Patient` est décrit par les pathologies dont il est atteint (`:Patient :aPourPathologie :Pathologie`), les dispositifs médicaux dont il bénéficie comme un stent, une prothèse ou autre (`:Patient :aPourDispositifMedical :DispositifMedical`), les freins auxquels il est confronté (`:Patient :aPourFrein :Frein`). Les caractéristiques du patient sont également prises en compte afin de favoriser une meilleure adhérence à la pratique d'activité physique, comme l'âge ou plus exactement la tranche d'âge (`:Patient :aPourTrancheAge :TrancheAge`), ou le sexe (`:Patient :aPourGenre :Genre`).

Concernant le suivi des patients, ceux-ci feront l'objet de prescriptions (`:Patient :aPourPrescription :Prescription`) qui feront référence aux activités physiques prescrites (`:Prescription :contient :ActivitePhysique`). Lors des prescriptions, les conditions d'exercice des activités physiques (fréquence, durée, nombre de répétions) sont associés aux propriétés `:aPourFrequence`, `:aPourIntensite` et `aPourNbRepetitions` entre `:ActivitéPhysique` et des valeurs entières.

TABLE 2 – Synthèse du document de spécification des exigences ontologiques (ORSD) pour APA4CAD.

Objectif	Fournir un modèle ontologique dédié à la représentation des modalités d'activité physique adaptée (APA) chez les patients coronariens en phase III de réadaptation cardiaque afin de : (i) mieux organiser et individualiser le suivi des patients ; (ii) homogénéiser les pratiques de prescription entre professionnels ; (iii) assurer la traçabilité des recommandations effectuées au cours du suivi ; (iv) fournir un cadre formel permettant de vérifier la cohérence d'une prescription au regard du profil clinique du patient.
Portée	Domaine de la réadaptation cardiaque en phase III, pour les patients atteints de pathologie coronarienne. L'ontologie s'inscrit dans un contexte clinique et académique, et vise à produire un impact à l'échelle régionale, voire nationale puis internationale.
Langage d'implémentation	OWL 2 DL
Utilisateurs finaux visés	Utilisateur 1. Professionnels de santé impliqués en phase III (enseignants en APA, cardiologues, kinésithérapeutes, infirmiers). Utilisateur 2. Chercheurs en sciences du sport et santé numérique.
Utilisations prévues	Usage 1. Structurer les connaissances relatives à la prescription d'APA. Usage 2. Assurer la cohérence d'une prescription par raisonnement logique.
Exigences ontologiques	*Exigences non fonctionnelles :* interopérabilité avec SNOMED CT et support bilingue français / anglais. *Exigences fonctionnelles :* Représentation des recommandations et des contre-indications en fonction des pathologies et des profils patient ; Inférence logique pour la validation des prescriptions.
Pré-glossaire	Patient ; Modalité d'APA ; Exercice ; Type d'activité ; Limitation ; Contre-indication ; Facteur de risque ; Motivation ; Environnement ; Prescription ; Suivi.

3.3 Formalisation et implémentation

Cette étape permet de décrire les différents choix de formalisation et d'implémentation effectués.

Axiomatisation. Les règles de compatibilité clinique définies entre patients, pathologies et activités physiques sont décrites par un ensemble d'axiomes formulés en logique de description. Ces axiomes permettent ainsi de vérifier l'adéquation des activités prescrites aux profils des patients, et surtout de lever les inconsistances en cas de prescription non adaptée. Nous donnons ci dessous à titre d'exemples quelques uns de ces axiomes :

1. *Un patient est une personne qui souffre d'au moins une pathologie.*
$Patient \sqsubseteq Personne \sqcap \exists aPourPathologie.Pathologie$

2. *L'angor stable est une pathologie coronarienne pour laquelle les activités d'aquagym, d'étirement, d'endurance et de renforcement musculaire sont recommandées, mais en respectant certaines contraintes : la montée en intensité pour l'endurance doit se faire progressivement, sans aller au delà des intensités de niveau Borg0-2 ou Borg3-4 ; la montée en intensité pour le renforcement musculaire doit se faire aussi progressivement, en réduisant la charge. Les sports collectif, de combat, extrême, motorisé et la musculation lourde sont par contre contre-indiqués.*

$$
\begin{aligned}
AngorStable \sqsubseteq\ & Pathologie_coronarienne \\
& \sqcap \exists\, aPourActiviteRecommandee.Aquagym \\
& \sqcap \exists\, aPourActiviteRecommandee.Etirement \\
& \sqcap \exists\, aPourActiviteRecommandee.(ActiviteEndurance \\
& \quad \sqcap \exists\, aPourAdaptation.MonteeProgressiveIntensite \\
& \quad \sqcap \exists\, aPourAdaptation.(Borg0_2 \sqcup Borg3_4)) \\
& \sqcap \exists\, aPourActiviteRecommandee.(RenforcementMusculaire \\
& \quad \sqcap \exists\, aPourAdaptation.MonteeProgressiveIntensite \\
& \quad \sqcap \exists\, aPourAdaptation.ReductionDeCharge) \\
& \sqcap \exists\, aPourContreIndication.MusculationLourde \\
& \sqcap \exists\, aPourContreIndication.SportCollectif \\
& \sqcap \exists\, aPourContreIndication.SportDeCombat \\
& \sqcap \exists\, aPourContreIndication.SportExtreme \\
& \sqcap \exists\, aPourContreIndication.SportMotorise
\end{aligned}
$$

3. *Les activités recommandées et contre-indiquées pour une même pathologie s'excluent.*
$aPourActiviteRecommandee \sqcap aPourContreIndication \sqsubseteq \bot$

4. *Les activités prescrites pour un patient sont inférées à partir des activités contenues dans sa prescription.*
$aPourPrescription \circ contient \sqsubseteq aPourActivitePrescrite$

5. *Les activités interdites pour un patient sont inférées à partir des pathologies dont est atteint le patient.*
$aPourpathologie \circ aPourContreIndication \sqsubseteq aPourActiviteInterdite$

Modélisation ayant recours au punning. Le mécanisme de punning proposé par OWL 2 a été utilisé afin de permettre l'utilisation d'un même identifiant pour représenter une entité selon plusieurs niveaux sémantiques distincts, notamment comme classe et comme individu. Ce mécanisme a été appliqué notamment aux concepts de pathologies afin de répondre au besoin de représenter simultanément deux niveaux de modélisation. D'une part, les pathologies sont définies comme des classes issues de la terminologie médicale. D'autre part, les patients, représentés par des instances, doivent être liés aux pathologies dont ils sont affectés, ce qui implique de manipuler ces pathologies comme des individus.

Interopérabilité. Un travail d'alignement a été réalisé en mettant en correspondance certains concepts d'APA4CAD (pathologies, dispositifs médicaux, activités physiques) avec leurs équivalents dans SNOMED CT, retenu comme terminologie clinique de référence pour la structuration des concepts de santé.

Plutôt que d'importer directement SNOMED CT, dont la taille et la complexité sont importantes, nous avons privilégié une approche d'interopérabilité fondée sur des correspondances sémantiques.
Cet alignement repose sur l'utilisation de propriétés d'annotation du vocabulaire SKOS (`skos:exactMatch`, `skos:closeMatch`, `skos:broadMatch`), permettant d'établir des correspondances entre concepts. Les liens ont été définis à partir des concepts SNOMED identifiés via leurs URI (e.g. BioPortal), puis comparés manuellement aux concepts de l'ontologie à partir de leurs labels et de leurs définitions. Le type de correspondance a été déterminé en fonction du degré de similarité sémantique observé : `skos:exactMatch` a été retenu en cas d'équivalence stricte des définitions et du périmètre conceptuel, `skos:closeMatch` lorsque des différences mineures de portée ou de contexte étaient présentes, et `skos:broadMatch` lorsque le concept SNOMED CT correspondait à une notion plus générale. L'articulation d'autres standards d'échange tels que FHIR [1] relève quant à elle d'une perspective d'intégration technique ultérieure, complémentaire à ce travail. Le Tableau 3 illustre ces correspondances.
En complément de SNOMED CT, une correspondance avec PROV-O [28] a été établie via *skos :closeMatch*, reliant certaines classes à *prov :Activity* et *prov :Agent*. Cet alignement permet de relier des concepts centraux tels que Patient, Prescription et ActivitéPhysique à des notions générales d'agent et d'activité, tout en préservant la spécificité du domaine clinique.

Adhésion aux principes FAIR. Conformément aux principes FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable), plusieurs mesures ont été mises en œuvre afin de favoriser la diffusion et la réutilisation de l'ontologie. Au delà des métadonnées classiques (nom de l'ontologie, URI, version, description, date de publication, auteurs, etc.), APA4CAD a été enrichie par des annotations multilingues, incluant les labels et les définitions en français et en anglais, afin d'améliorer son accessibilité et son réemploi dans différents contextes linguistiques. APA4CAD est accesssible depuis le dépôt public GitHub https://github.com/Morgane-Ontology/APA4CAD, sous licence Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) qui autorise la réutilisation et la modification sous réserve de citation de la source.
Implémentation. Le modèle a été implémenté en OWL 2 DL à l'aide du logiciel Protégé. L'ontologie comporte actuellement 275 classes, 28 propriétés d'objet, 45 propriétés de données, 718 axiomes logiques et 86 propriétés d'annotation. Parmi elles, la majorité des classes concernent les activités physiques (79) , les autres se répartissant entre les pathologies (38), les freins (37), les leviers (35) et d'autres les caractéristiques environnement et ressources tél que adaptation (14), équipement de sport (17) acte et dispositif médical (9), objectifs (3) personne (1).

3.4 Méthode d'instanciation

Le principal objectif de APA4CAD est d'assurer le suivi individuel des patients afin de maintenir la pratique d'activité physique, en structurant les prescriptions successives et en permettant la vérification automatique de leur cohérence au regard du profil clinique du patient. Ce processus de suivi repose sur l'instanciation du modèle conceptuel précédemment décrit (Figure 1).
Chaque patient est représenté par une instance `:Patient_i`. Toute prescription donne lieu à la création d'une instance `:Prescription_j`, spécifique à un patient. La prescription `:Prescription_j` est datée (`:Prescription_j :aPourDate`) `"X"^^xsd:date`, où X correspond à une valeur de type `xsd:date`, et rattachée à un patient (`:Patient_j`). Chaque activité prescrite lors d'une prescription donne lieu à la création d'une instance `:ActivitePhysique_ij`, reliée à `:Prescription_i` par la relation `:contient`. Les concepts `:Pathologie`, `:Equipement`, etc., sont définis comme classes et peuvent également être manipulés comme individus grâce au mécanisme de punning, permettant de relier les instances de patients aux entités cliniques correspondantes.
Une fois les instances créées, l'exécution du raisonneur permet d'inférer automatiquement les activités prescrites, recommandées ou interdites, en fonction des axiomes définis dans le modèle.
Afin d'illustrer le mécanisme d'inférence, la Figure 2 décrit un scénario dans lequel `:Patient_1` atteint d'angor stable (`:aPourPathologie :AngorStable`), pour lequel une activité d'aquagym (`:Aquagym_1`) et un sport de combat (`:SportDeCombat_1`) ont été prescrits. Le modèle permet d'identifier les activités conformes aux recommandations et celles qui ne le sont pas. Dans ce cas, il infère correctement que le sport de combat est interdit (`:Patient_1 :aPourActiviteInterdite :SportDeCombat_1`), en raison de la contre-indication associée à l'angor stable (`:AngorStable :aPourContreIndication :SportDeCombat`), tandis que l'aquagym est conforme aux recommandations (`:AngorStable :aPourActiviteRecommande :Aquagym`).

3.5 Évaluation

L'évaluation de APA4CAD s'est fait selon trois critères : cohérence logique du modèle, évaluation qualitative à l'aide de OOPS [2] et validation fonctionnelle grâce aux CQs.

3.5.1 Cohérence logique

La cohérence logique de l'ontologie ainsi que la satisfaisabilité des classes ont été vérifiées à l'aide des raisonneurs ELK (version 0.6.0) et HermiT (version 1.4.3.456). Aucun concept insatisfiable ni d'incohérence n'a été détecté à l'issue du processus de raisonnement, confirmant la consistance du modèle ontologique.

1. FHIR (Fast Healthcare Interoperability Resources) est un standard d'interopérabilité pour l'échange structuré de données de santé, développé par HL7.

2. OOPS (OntOlogy Pitfall Scanner !) est un outil de détection automatique des défauts de modélisation dans les ontologies OWL.

TABLE 3 – Alignement entre les concepts de l'ontologie APA4CAD et les concepts SNOMED CT.

Classe APA4CAD	Subclass of	Concept SNOMED	SCTID	Correspondance	Justification
Activité physique		Physical activity	68130003	closeMatch	Correspondance proche ; le concept SNOMED décrit une activité physique observée, tandis qu'APA4CAD en propose une modélisation plus structurée.
Adaptation		Adaptation	228649000	closeMatch	Concept proche ; dans APA4CAD, « adaptation » renvoie aux ajustements spécifiques des modalités d'exercice.
Dispositif médical		Medical device	49062001	broadMatch	Le concept SNOMED « Device » est plus général, englobant tout type de dispositif, alors qu'APA4CAD se limite aux dispositifs médicaux.
Frein		Barrier	–	NoMatch	SNOMED ne modélise pas explicitement les barrières comportementales ou environnementales.
Intensité (Borg)		Borg scale	263487004	exactMatch	Correspondance directe avec l'échelle de Borg utilisée pour l'évaluation de l'intensité perçue.
Levier		Facilitator	–	NoMatch	Absence de concept dans SNOMED.
Objectif		Goal	–	NoMatch	Le concept « objectif » n'est pas représenté comme classe générique dans SNOMED.
Pathologie		Disease	64572001	broadMatch	Le concept SNOMED « Disease » est plus large, tandis qu'APA4CAD utilise « pathologie » comme classe générique structurante.
–	Cancer	Cancer	363346000	exactMatch	Correspondance directe avec le concept.
–	Infarctus du myocarde	Myocardial infarction	22298006	exactMatch	Correspondance directe.
Patient		Patient	116154003	exactMatch	Correspondance directe avec le concept.
Prescription		Prescription	310882002	closeMatch	Correspondance proche ; le concept SNOMED renvoie spécifiquement à la prescription d'exercice.
Équipement de sport		Sports equipment	–	NoMatch	SNOMED ne fournit pas de classe générique couvrant l'équipement sportif dans ce contexte.

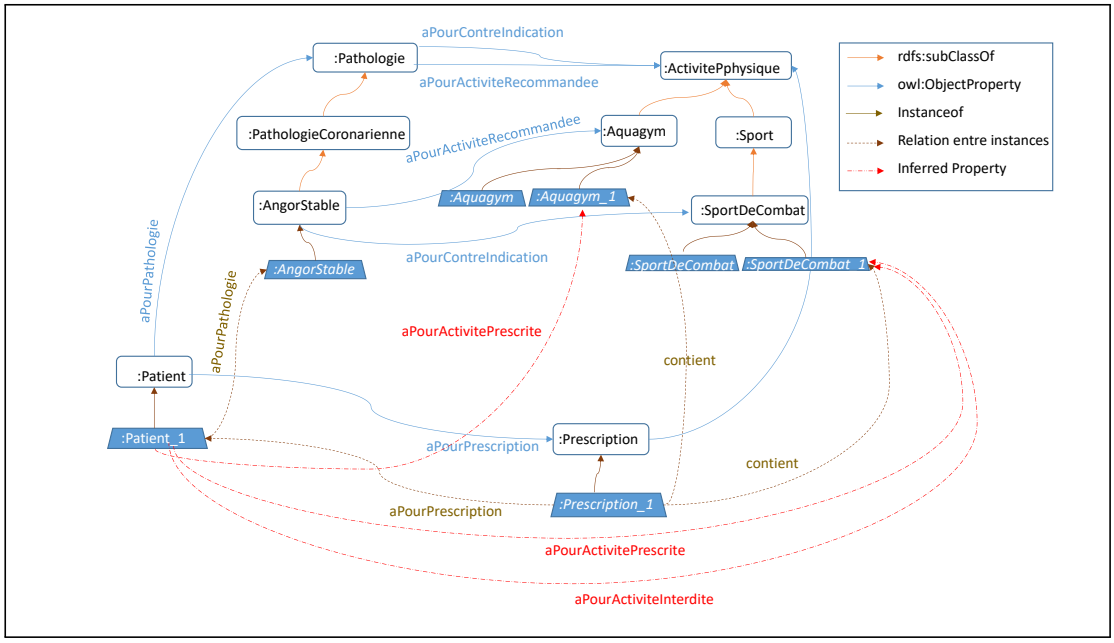

FIGURE 2 – APA4CAD : schéma d'instanciation.

3.5.2 Validation qualitative

Une analyse à l'aide de l'outil OOPS ! (Ontology Pitfall Scanner) a été réalisée afin d'identifier d'éventuels problèmes de conception. Aucun pitfall critique n'a été détecté. Les observations sont mineures et concernent principalement l'absence d'annotations pour 214 concepts (P08), l'absence de déclaration explicite de certaines relations inverses (P13, 19 cas) ainsi que des incohérences dans les conventions de nommage (P22). S'agissant du pitfall relatif aux relations inverses, le choix a été fait de ne pas alourdir inutilement l'ontologie par l'introduction systématique de propriétés inverses. Ainsi, seules les relations pour lesquelles une inverse présentait un intérêt sémantique ou fonctionnel ont été explicitement modélisées.

3.5.3 Validation fonctionnelle

La validation fonctionnelle a consisté à tester la capacité du modèle à répondre aux competency questions définies lors de la phase de spécification. Des scénarios d'instanciation ont été construits afin de vérifier le comportement des mécanismes d'inférence dans différentes configurations cliniques. Les questions de compétence ont été exprimées en SPARQL[3], puis exécutées dans l'environnement Protege.
Les résultats obtenus sont cohérents avec les axiomes définis dans le modèle, notamment pour l'identification des activités recommandées ou contre-indiquées et pour la propagation des prescriptions à partir des relations instanciées. Un document détaillant les scénarios d'instanciation, les requêtes exprimées en langue naturelle, les requêtes exprimées en SPARQL, et les réponses obtenues est mis à disposition dans le dépôt GitHub https://github.com/Morgane-Ontology/APA4CAD-SPARQL , afin d'assurer la transparence et la reproductibilité de l'évaluation.

TABLE 4 – APA4CAD Ontology Metrics

Category	Metric	Count
Global Metrics		
	Axiom	3086
	Logical axioms	718
	Declaration axioms	833
	Classes	275
	Object properties	45
	Data properties	28
	Individual count	396
	Annotation properties	86
Class Axioms		
	SubClassOf	251
	EquivalentClasses	1
	DisjointClasses	4
	Hidden GCI	1
Object Property Axioms		
	InverseObjectProperties	11
	DisjointObjectProperties	2
	IrreflexiveObjectProperty	1
	ObjectPropertyDomain	32
	ObjectPropertyRange	33
	SubPropertyChainOf	2
Data Property Axioms		
	DataPropertyDomain	14
	DataPropertyRange	14
Individual Axioms		
	ClassAssertion	260
	ObjectPropertyAssertion	54
	DataPropertyAssertion	5
Annotation Axioms		
	AnnotationAssertion	1438

4 Discussion

4.1 Apports

À notre connaissance, aucune ontologie ne modélise de manière intégrée les relations entre profils cliniques, modalités d'exercice, adaptations et contraintes contextuelles chez les patients coronariens en phase III. Bien que certaines ontologies biomédicales structurent des pathologies et des actes, elles ne couvrent pas l'ensemble des dimensions nécessaires à l'individualisation de l'APA dans ce contexte.
L'ontologie proposée permet une individualisation du suivi en intégrant pathologies, limitations, prescriptions et facteurs influençant l'adhésion, conformément aux recommandations internationales préconisant une adaptation des interventions au profil clinique [29]. Elle contribue également à une homogénéisation des pratiques de prescription en explicitant les règles de compatibilité entre profil clinique et modalités d'exercice, en réponse à l'hétérogénéité décrite dans la littérature [9][30].

3. SPARQL : Protocol and RDF Query Language est un langage de requête standardisé par le W3C pour interroger des données RDF. Voir : https ://www.w3.org/TR/sparql11-query/

La structuration des prescriptions et de leurs conditions d'application renforce la traçabilité des décisions, enjeu central dans les dispositifs de télésuivi [8][10]. L'ontologie constitue également un support d'aide à la décision fondé sur un raisonnement symbolique, permettant de vérifier la cohérence des prescriptions au regard du profil clinique [16][17].
En tant que ressource OWL 2 DL, APA4CAD peut être intégrée dans des solutions numériques comme base de connaissances explicite et servir de socle à des architectures hybrides combinant raisonnement symbolique et modèles génératifs, notamment dans des approches de type Retrieval-Augmented Generation [31].

4.2 Limites

Plusieurs limites doivent être considérées.
Premièrement, APA4CAD ne répond pas, à ce stade, à l'ensemble des besoins liés à la prescription d'activité physique adaptée. Le modèle a été développé dans un contexte clinique et organisationnel spécifique, à l'aide de ressources précises et pour un système de santé donné. L'élargissement à d'autres systèmes organisationnels nécessiteront des adaptations du modèle.

Deuxièmement, la maintenance et l'évolution d'une ontologie impliquent un coût méthodologique et humain important, mobilisant des experts de la représentation des connaissances et du domaine.
Troisièmement, le passage à l'échelle induirait une forte augmentation du nombre de concepts, de relations et d'axiomes, ce qui pourrait soulever des enjeux de calculabilité et de performance au niveau des mécanismes d'inférence.

5 Conclusion

Cette étude propose APA4CAD, une ontologie dédiée à la structuration des modalités d'activité physique adaptée chez les patients coronariens en phase III de réadaptation cardiaque. En formalisant explicitement les relations entre profil clinique, prescriptions, adaptations et contre-indications, le modèle fournit un cadre sémantique permettant de vérifier la cohérence des recommandations d'exercice et d'en assurer la traçabilité. Ce travail ouvre des perspectives à différents niveaux : À court terme, ces travaux permettront un déploiement auprès de professionnels impliqués dans la phase III, afin d'en évaluer l'utilisabilité et les retombées sur l'homogénéité des pratiques et le suivi des patients. L'enrichissement progressif du modèle à l'échelle locale, puis régionale, constituera une étape structurante de son évolution. À plus long terme, APA4CAD pourrait servir de socle à des outils numériques d'aide à la décision. Son articulation avec des standards d'échange comme FHIR et son intégration dans des architectures hybrides combinant raisonnement symbolique et modèles de langage (approches de type Retrieval-Augmented Generation) ouvrent des perspectives pour le développement de systèmes capables d'associer structuration des connaissances, validation logique des prescriptions et génération contextualisée de recommandations.

Bibliographie

Références

[1] "Cardiovascular diseases (CVDs)." https ://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds).

[2] C. Grave, A. Gabet, N. Danchin, M.-C. Iliou, G. Lailler, P. Tuppin, A. Cohen, J. Blacher, E. Puymirat, and V. Olié, "Epidemiology of ischaemic heart disease in France," *Archives of Cardiovascular Diseases*, vol. 117, no. 12, pp. 725–737, 2024.

[3] K. Prasad, "Current Status of Primary, Secondary, and Tertiary Prevention of Coronary Artery Disease," *The International Journal of Angiology : Official Publication of the International College of Angiology, Inc*, vol. 30, pp. 177–186, Aug. 2021.

[4] C. Giuliano, B. J. Parmenter, M. K. Baker, B. L. Mitchell, A. D. Williams, K. Lyndon, T. Mair, A. Maiorana, N. A. Smart, and I. Levinger, "Cardiac Rehabilitation for Patients With Coronary Artery Disease : A Practical Guide to Enhance Patient Outcomes Through Continuity of Care," *Clinical Medicine Insights. Cardiology*, vol. 11, p. 1179546817710028, 2017.

[5] V. Janssen, V. D. Gucht, E. Dusseldorp, and S. Maes, "Lifestyle modification programmes for patients with coronary heart disease : A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials," *European Journal of Preventive Cardiology*, vol. 20, pp. 620–640, Aug. 2013.

[6] J. Liu, Q. Zhao, Q. Shen, X. Meng, Y. Zheng, C. Lu, and Y. Zheng, "Advances in theories and models of cardiac rehabilitation after acute myocardial infarction : A narrative review," *Medicine*, vol. 103, p. e39755, Dec. 2024.

[7] P. Winnige, R. Vysoky, F. Dosbaba, and L. Batalik, "Cardiac rehabilitation and its essential role in the secondary prevention of cardiovascular diseases," *World Journal of Clinical Cases*, vol. 9, pp. 1761–1784, Mar. 2021.

[8] M. Heimer, S. Schmitz, M. Teschler, H. Schäfer, E. R. Douma, M. Habibovic, W. J. Kop, T. Meyer, F. C. Mooren, and B. Schmitz, "eHealth for maintenance cardiovascular rehabilitation : A systematic review and meta-analysis," *European Journal of Preventive Cardiology*, vol. 30, pp. 1634–1651, Oct. 2023.

[9] L. Anderson, N. Oldridge, D. R. Thompson, A.-D. Zwisler, K. Rees, N. Martin, and R. S. Taylor, "Exercise-Based Cardiac Rehabilitation for Coronary Heart Disease : Cochrane Systematic Review and Meta-Analysis," *Journal of the American College of Cardiology*, vol. 67, pp. 1–12, Jan. 2016.

[10] R. Huang, S. C. Palmer, Y. Cao, H. Zhang, Y. Sun, W. Su, L. Liang, S. Wang, Y. Wang, Y. Xu, N. D. Melgiri, L. Jiang, G. F. M. Strippoli, and X. Li, "Cardiac Rehabilitation Programs for Chronic Heart Disease : A Bayesian Network Meta-analysis," *The Canadian Journal of Cardiology*, vol. 37, pp. 162–171, Jan. 2021.

[11] T. Bullard, M. Ji, R. An, L. Trinh, M. Mackenzie, and S. P. Mullen, "A systematic review and meta-analysis of adherence to physical activity interventions among three chronic conditions : Cancer, cardiovascular disease, and diabetes," *BMC Public Health*, vol. 19, p. 636, May 2019.

[12] T. Strain, S. Flaxman, R. Guthold, and E. e. a. Semenova, "National, regional, and global trends in insufficient physical activity among adults from 2000 to 2022 : A pooled analysis of 507 population-based surveys with 5·7 million participants," *The Lancet Global Health*, vol. 12, pp. e1232–e1243, Aug. 2024.

[13] J. Fleury, S. M. Lee, B. Matteson, and M. Belyea, "Barriers to physical activity maintenance after cardiac rehabilitation," *Journal of Cardiopulmonary Rehabilitation*, vol. 24, no. 5, pp. 296–305 ; quiz 306–307, 2004.

[14] D. Hansen, G. Rovelo Ruiz, P. Doherty, M.-C. Iliou, T. Vromen, S. Hinton, I. Frederix, M. Wilhelm, J.-P. Schmid, A. Abreu, M. Ambrosetti, E. Garcia-Porrero, K. Coninx, P. Dendale, and on behalf of the EAPC EXPERT working group, "Do clinicians prescribe exercise similarly in patients with different cardiovascular diseases ? Findings from the EAPC EXPERT working group survey," *European Journal of Preventive Cardiology*, vol. 25, pp. 682–691, May 2018.

[15] L. P. Whitsel, A. Bantham, P. J. Chase, P. Dunn, L. Hovind, and B. McSwain, "The current state of physical activity assessment and interventions with public policy solutions," *Progress in Cardiovascular Diseases*, vol. 83, pp. 29–35, Mar. 2024.

[16] T. R. Gruber, "A translation approach to portable ontology specifications," *Knowledge Acquisition*, vol. 5, pp. 199–220, June 1993.

[17] M. Uschold and M. Grüninger, "Ontologies : Principles, methods and applications," *The Knowledge Engineering Review*, vol. 11, Jan. 1996.

[18] H. Kim, J. Mentzer, and R. Taira, "Developing a Physical Activity Ontology to Support the Interoperability of Physical Activity Data," *Journal of Medical Internet Research*, vol. 21, p. e12776, Apr. 2019.

[19] K. Livitckaia, V. Koutkias, E. Kouidi, M. van Gils, N. Maglaveras, and I. Chouvarda, ""OPTImAL" : An ontology for patient adherence modeling in physical activity domain," *BMC Medical Informatics and Decision Making*, vol. 19, p. 92, Apr. 2019.

[20] M. Braun, S. Carlier, A. De Paepe, F. De Backere, F. De Turck, and G. Crombez, "Development and evaluation of the COntextualised and Personalised Physical activity and Exercise Recommendations (COPPER) Ontology," *The International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, vol. 22, p. 52, May 2025.

[21] A. Chatterjee and A. Prinz, "Personalized Recommendations for Physical Activity e-Coaching (OntoRecoModel) : Ontological Modeling," *JMIR Medical Informatics*, vol. 10, p. e33847, June 2022.

[22] A. Chatterjee, N. Pahari, and A. Prinz, "HL7 FHIR with SNOMED-CT to Achieve Semantic and Structural Interoperability in Personal Health Data : A Proof-of-Concept Study," *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 22, p. 3756, May 2022.

[23] C. Gaudet-Blavignac, V. Foufi, M. Bjelogrlic, and C. Lovis, "Use of the Systematized Nomenclature of Medicine Clinical Terms (SNOMED CT) for Processing Free Text in Health Care : Systematic Scoping Review," *Journal of Medical Internet Research*, vol. 23, p. e24594, Jan. 2021.

[24] M. Ayaz, M. F. Pasha, M. Y. Alzahrani, R. Budiarto, and D. Stiawan, "The Fast Health Interoperability Resources (FHIR) Standard : Systematic Literature Review of Implementations, Applications, Challenges and Opportunities," *JMIR Medical Informatics*, vol. 9, p. e21929, July 2021.

[25] "Fernández-López, M., Gómez-Pérez, A. and Juristo, N. (1997) Methontology From Ontological Art towards Ontological Engineering. - References - Scientific Research Publishing." https ://www.scirp.org/reference/referencespapers ?referenceid=1576515.

[26] M. C. Suárez-Figueroa, A. Gómez-Pérez, and M. Fernández-López, "The neon methodology framework : A scenario-based methodology for ontology development," *Applied Ontology*, vol. 10, no. 2, pp. 107–145, 2015.

[27] M. Molina, F. Durand, and H. Meric, "Barriers to physical activity and patient profiling in the lifelong maintenance phase of coronary artery disease : A territorial mixed-methods pilot study," *Frontiers in Rehabilitation Sciences*, vol. 6, Oct. 2025.

[28] K. Belhajjame, R. B'Far, J. Cheney, S. Coppens, S. Cresswell, Y. Gil, P. Groth, G. Klyne, T. Lebo, J. McCusker, *et al.*, "Prov-dm : The prov data model," *W3C Recommendation*, vol. 14, pp. 15–16, 2013.

[29] A. Pelliccia, S. Sharma, S. Gati, M. Bäck, M. Börjesson, S. Caselli, J.-P. Collet, D. Corrado, J. A. Drezner, M. Halle, D. Hansen, H. Heidbuchel, J. Myers, J. Niebauer, M. Papadakis, M. F. Piepoli, E. Prescott, J. W. Roos-Hesselink, A. Graham Stuart, R. S. Taylor, P. D. Thompson, M. Tiberi, L. Vanhees, M. Wilhelm, and ESC Scientific Document Group, "2020 ESC Guidelines on sports cardiology and exercise in patients with cardiovascular disease," *European Heart Journal*, vol. 42, pp. 17–96, Jan. 2021.

[30] R. S. Taylor, H. M. Dalal, and S. T. J. McDonagh, "The role of cardiac rehabilitation in improving cardiovascular outcomes," *Nature Reviews. Cardiology*, vol. 19, pp. 180–194, Mar. 2022.

[31] P. Lewis, E. Perez, A. Piktus, F. Petroni, V. Karpukhin, N. Goyal, H. Küttler, M. Lewis, W.-t. Yih, T. Rocktäschel, S. Riedel, and D. Kiela, "Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive nlp tasks," in *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, 2020.