

Prévention et auto-rééducation de pathologies ostéoarticulaires assistées par intelligence artificielle

Dr Laurent Cervoni¹, Dr Julien Brasseur¹, Dr Med. Mehdi Roudesli²

¹ Centre de Recherche et d'Innovation de Talan, Paris, France

² Centre de l'appareil locomoteur de l'estuaire, Le Havre

laurent.cervoni@talan.com, julien.brasseur@talan.com,
m.roudesli@skeewai.com

Résumé

Les pathologies ostéo-articulaires et tout particulièrement les lombalgies ou les entorses de cheville sont un enjeu de santé publique. Les données décrivant l'impact des traitements sur l'évolution des pathologies sont insuffisantes pour imaginer un processus d'auto-apprentissage. Nous avons donc conçu une application basée, notamment, sur des règles de consensus médicales capable de générer des séances d'exercices adaptées à la pathologie du patient et à son évolution. Nous avons retenu une approche qui, partant de l'entorse de cheville, a pu être généralisée à 12 pathologies et a donné lieu à une application opérationnelle. Recov'up, issue de ces travaux, est disponible sous forme de WebApp (<https://recovup.com>).

Mots-clés

Troubles musculo-squelettiques, Intelligence Artificielle, Santé, Programmation Logique, Règles de consensus

Abstract

Osteoarticular pathologies, particularly low back pain and ankle sprains, are a public health issue. The data describing the impact of treatments on the evolution of pathologies are insufficient to imagine a self-learning process. We have therefore designed an application based, in particular, on medical consensus rules capable of generating exercise sessions adapted to the patient's pathology and its evolution. We selected an approach that, starting from ankle sprains, could be generalized to 12 pathologies and resulted in an operational Web application. Recov'up, resulting from this work, is available as a WebApp (<https://recovup.com>).

Keywords

Musculoskeletal disorders, Artificial Intelligence, Health, Logical Programming, Consensus rules

1 Introduction

Les pathologies ostéoarticulaires des membres inférieurs représentent 25 % de l'ensemble des pathologies

ostéoarticulaires. La cheville, avec près de 6000 personnes atteintes [1] par jour en France, représente, à elle seule, 7 à 10 % des urgences hospitalières et plus d'un quart des pathologies des membres inférieurs. Il s'agit d'un problème de Santé publique dont le coût est estimé à 1.2 millions d'euros par jour. Le coût total annuel, pour la société, des entorses de cheville a même été estimé approximativement à 40 millions d'euros par million d'habitants.

Le chiffre des récurrences est éloquent : 30 % des gens présentent un problème persistant au-delà de 1 an. ([2] et [3]). D'autres études pointent des séquelles encore plus importantes. Ceci souligne l'importance de la prévention et de traitements rapide, notamment par la mise en œuvre d'exercices de rééducation ([4]).

La prise en charge se fait, généralement, sur la base de « règles de consensus » médicales qui permettent d'évaluer la gravité de la pathologie. Les approches par proprioception, par exemple, ont entraîné une réduction de 50 % des récurrences [5]. Il est aussi mis en avant la place de l'*auto-rééducation dans la stratégie de rééducation.*

La comparaison d'une rééducation supervisée par un praticien et une auto-rééducation à domicile tend à montrer des résultats fonctionnels similaires pour la cheville. On observe une meilleure observance, notamment pour le respect des rendez-vous médicaux et un meilleur résultat de suivi du programme de soin.

Les lombalgies constituent aussi un enjeu de santé publique similaire, 80% de la population étant susceptible de souffrir de lombalgie au cours de sa vie, et plus de la moitié de la population française déclare un épisode de mal de dos sur une année¹. En première intention, une autogestion et des exercices ciblés sont recommandés par la HAS. Pour cette pathologie aussi plusieurs études ont cherché à démontrer l'intérêt des soins en autonomie éventuellement assistés par une application ([6] et [7]).

Il paraît donc pertinent de pouvoir autonomiser le patient dans la réalisation de tests fonctionnels seuls ou assistés par

¹ <https://www.ameli.fr/medecin/sante-prevention/pathologies/lombalgies/enjeu-sante-publique>

informatique, afin que les praticiens aient accès à davantage d'informations pour personnaliser le parcours de soins.

L'intelligence artificielle peut donc jouer un rôle significatif dans l'accompagnement des rééducations des pathologies ostéoarticulaires et cette stratégie d'autonomisation. Toutefois, si l'IA connaît un nombre croissant d'applications médicales, la plupart d'entre-elles portent sur l'aide au diagnostic ou l'imagerie et beaucoup plus rarement sur la thérapeutique. Une des raisons majeures à cela réside dans le caractère sensible des données médicales. Aussi, dans bien des cas, il n'existe aucune base de données disponible, ce qui est le cas des pathologies ostéoarticulaires.

Dans cet article, nous présentons un cas pratique (Recov'Up) conçu dans le cadre d'une collaboration entre la start-up Skeewai et le Centre de Recherche et d'Innovation du groupe Talan. Celle-ci repose principalement sur des règles de consensus, les recommandations de la Haute Autorité de Santé² et la mise en pratique de l'expertise de praticiens (médecins du sport et kinésithérapeutes) exprimée sous forme de règles « logiques ».

2 Genèse et contexte des travaux

Au coût total pour la société, et pour les entreprises privées, de la prise en charge des pathologies telles que l'entorse de cheville et des arrêts de travail qui en découlent, s'ajoute le risque de récurrence. Une re-mobilisation rapide dans le cadre de l'entorse de cheville semble être favorable à la réduction des risques de récurrences [8] et [9].

Pourtant, seuls 50 % des cas font l'objet d'un suivi médical. Une large proportion des patients risque donc de développer une instabilité chronique de la cheville. ([10] et [11]).

Il n'existe pourtant pas de méthode médicale universelle « déterministe » pour traiter l'entorse de cheville. Cette situation n'est pas surprenante au regard du nombre de facteurs qui entrent en jeu dans la pathologie et l'essence même de la pratique médicale qui doit être la plus personnalisée.

Le site Ameli précise, concernant la rééducation, que « *Le nombre de séances préconisées est de 10 pour une entorse de cheville récente. La rééducation n'est pas systématique, et se propose en fonction des besoins estimés par le médecin.* »

Ainsi, il existe des recommandations sur avis d'experts dont la réalisation de tests d'évaluation des déficiences sensorimotrices. Notamment, dans les travaux les plus récents et qui constituent la référence internationale en matière d'analyse de l'entorse de cheville, on observe que « *Le comité exécutif de l'International Ankle Consortium est parvenu à un consensus sur les recommandations pour une évaluation clinique structurée des lésions latérales aiguës de l'entorse de la cheville. Les recommandations sont fournies sur la base d'une évaluation clinique diagnostique initiale. L'International Ankle Consortium ROAST [...] met l'accent sur l'évaluation des déficiences mécaniques et sensorimotrices connues pour être associées à une instabilité chronique de la cheville.* » (Source *Clinical assessment of acute lateral ankle*

sprain injuries (ROAST): 2019 consensus statement and recommendations of the International Ankle Consortium).

L'absence de démarche « algorithmique » ou simplement formelle conduit à envisager des approches expérimentales qui ne peuvent s'appuyer sur une programmation informatique traditionnelle.

L'absence de base de données de patients avec les suivis thérapeutiques associés évoquée précédemment vient s'ajouter aux motivations de retenir un système à base de règles pour proposer un accompagnement thérapeutique.

Le projet RecovUp a donc été initié sur la base de ces constats, début 2020. L'équipe médicale (1 kiné, 1 médecin du sport) a collecté l'ensemble des exercices utilisés par les praticiens et disponibles dans la littérature, utilisant ou non du matériel simple. La liste des exercices varie d'une vingtaine à plus de cinquante selon les pathologies prises en compte par l'application.

La mise en œuvre des exercices dans le parcours de soin a été définie par l'équipe médicale au regard du bénéfice apporté selon la date initiale de la pathologie, de sa nature, de la capacité du patient à effectuer certains tests fonctionnels simples et de réponses sur l'évolution de la douleur, notamment. Le développement du moteur modélisant les exercices et l'interface associé s'est étalé sur un an environ avant la mise en situation réelle.

3 Complexité de la génération d'exercices d'auto-rééducation

Dans le traitement de la cheville, nous avons retenu un panel de 30 exercices environ, classés dans différentes familles (sur la base notamment des recommandations de la Haute Autorité de Santé ([12])).

L'objectif est de proposer des séances de 3, 4 ou 5 exercices (le nombre étant fixé par les règles proposées par l'équipe médicales en fonction de l'évolution de la pathologie et en évitant la monotonie des séances afin de ne pas lasser le patient), choisis dans cette liste de 30 exercices.

L'espace complet pour 3 à 5 exercices est théoriquement $C_{30}^3 + C_{30}^4 + C_{30}^5 = 4060 + 27\ 405 + 142\ 506 = 173\ 971$. Dans la pratique, l'espace réel est un peu plus complexe à calculer, certains exercices devant, selon les situations, être pris dans une famille ou une autre et le nombre d'exercices ayant été étendu. Certaines familles sont exclusives des autres ou au contraire être associées.

Si on introduit les notions de durées, l'espace est nettement plus important. La gestion des durées se traduit par l'ajout de répétitions afin de rentrer dans un intervalle de temps pour qu'une séance soit acceptable pour le patient avec une durée minimale efficace.

Si on souhaite « simuler », dans un domaine discret, la gestion des exercices, cela reviendrait à ajouter à la liste des exercices tous les cas de répétitions possibles. Comme les exercices peuvent être réalisés sur des séries de 8 à 15 répétitions, 3 à 5 fois chacun, il y aurait donc un espace de 40 à 75 représentants

² https://www.has-sante.fr/upload/docs/application/pdf/2019-04/fm_lombalgie_v2_2.pdf et <https://www.has-sante.fr/upload/docs/application/pdf/recoentors.pdf>

de chaque exercice.

Dans ce cas, l'espace total dépasse plusieurs millions de combinaisons possibles (dans le pire des cas) puisqu'il faudrait calculer toutes les associations de répétitions.

Définition des règles

Nous avons structuré la génération des exercices en 4 catégories de règles :

- 1) Des règles générales :
 - Une séance doit comporter entre 3 et 5 exercices (selon l'évolution du patient et la pathologie)
 - Les règles de progressivité qui précisent l'évolution du nombre d'exercices et de séries d'un exercice doivent toujours être respectées
 - Une séance doit débuter par une mesure de la douleur au de repos, Echelle Visuelle Analogique (EVA), et terminer par une EVA post-séance
 - La rééducation se déroule sur une durée minimale (celle-ci pourra varier selon d'autres pathologies que la cheville) et ne s'achève que si un certain nombre de critères est atteint.
- 2) Des règles de progressivité dont un échantillon est :
 - Les exercices proposés doivent être issus d'au moins 2 familles différentes (celles-ci étant, par exemple, proprioception, renforcement, excentrique, etc...)
 - Avant J5 (ie dans les 5 jours qui suivent la blessure), appliquer le protocole « Glaçage, Repos, Elévation Compression » (GREC)
 - Aucun exercice des familles médicalement considérées comme peu efficaces, après J15
 - Aucun exercice de sur-sollicitation avant J15
 - Ne jamais proposer moins de 2 exercices de certaines familles à partir de J21
 - Etc...
- 3) Des règles d'irritabilité comme, par exemple :
 - Si l'EVA post-séance est supérieure à l'EVA de repos de plus de 20% alors ne pas suivre la règle de progressivité pour la séance suivante.
- 4) Des règles « de cause à effet » :
 - Des familles d'exercices différentes sont proposées en fonction de tests fonctionnels réalisés et auto-évalués par le patient.
 - Selon le résultat de scores (comme le Limb Symmetry Index), les exercices sont adaptés en intégrant aussi le fait que le patient dispose ou non du matériel nécessaire (élastique, coussin instable).

Etude de complexité

Considérons, à titre d'exemple, la règle "avant le cinquième jour, ne faire que des exercices de type A (dans la modélisation les familles d'exercices sont numérotées par des lettres), et jamais après". Cette dernière peut s'écrire sous la forme :

$$L_{\text{prog}}^{(1)} := \left(\bigwedge_{k \leq 5} \text{NbEx}(A, 1, k) \wedge \bigwedge_{j \notin A} \overline{\text{Exer}(j, k)} \right) \wedge \left(\bigwedge_{k > 5} \overline{\text{NbEx}(A, 1, k)} \right).$$

Ici, Exer(j,k) est un booléen qui est actif lorsqu'un exercice de type j est réalisé au jour k, et NbEx(A,1,k) est un booléen, construit à l'aide de Exer(j,k), dont la définition formelle est :

$$\text{NbEx}(A, 1, k) := \bigvee_{\substack{A \subset \Omega \\ \#(A \cap \mathcal{A}) \geq 1}} \bigwedge_{j \in A} \text{Exer}(j, k)$$

où \mathcal{A} correspond à l'ensemble des exercices de type A et Ω à l'ensemble de tous les exercices. Autrement dit, NbEx(A,1,k) est un booléen qui est actif lorsque l'on réalise au moins 1 exercice de type A au jour k.

L'ensemble des règles peuvent s'exprimer sous Forme Normale Conjonctive de manière analogue. Une fois ceci réalisé, l'on peut alors déduire la complexité mathématique de notre modèle.

En effet, le problème est exprimable sous forme booléenne, via

$$L_{\text{cheville}} := L_{\text{règles}} \wedge L_{\text{progressivité}} \wedge L_{\text{Questions-tests}}$$

où $L_{\text{règles}}$, $L_{\text{progressivité}}$ et $L_{\text{Questions-tests}}$ sont, respectivement, des clauses logiques regroupant l'ensemble des règles régissant (1) les règles générales et d'irritabilité (regroupés par commodité), (2) les règles de progressivité et, enfin, (3) les règles de cause à effet des questions fonctionnelles.

Notons que, par construction de $L_{\text{règles}}$, L_{Cheville} , se réécrit :

$$L_{\text{Cheville}} = C \wedge L' \text{ où } C := \bigvee_{k=28}^{70} \text{Fin}(k),$$

pour une certaine formule logique L' et avec $\text{Fin}(k)$, $k \in \llbracket 28, 70 \rrbracket$ (intervalle de durée des soins), vrai si l'utilisateur peut sortir de rééducation au jour k (dans la version en ligne la durée de soins peut-être prolongée mais cela ne modifie pas le raisonnement).

Comme L' peut toujours se réécrire sous forme normale conjonctive, on peut supposer, sans perte de généralité qu'elle est sous cette forme.

Comme la clause C comporte 42 termes ; il vient que L_{Cheville} est équivalent à un λ -SAT avec $\lambda \geq 42$.

4 Structure générale de Recov'Up

Le moteur de génération d'exercices correspond à la modélisation des règles exprimées par les médecins et kiné impliqués dans le projet et à la recherche d'un n-uplet satisfaisant ces règles.

L'objectif est de disposer d'un outil « intelligent » capable de construire des séances identiques à celles qu'un praticien pourrait les proposer en disposant d'un mécanisme d'explicabilité du raisonnement et en étant plus « imaginaire » qu'un humain par l'agrégation de différentes catégories d'exercices.

Prolog a été retenu pour sa facilité à représenter les contraintes descriptives de la situation, sa capacité à inférer sur celles-ci pour déterminer si une séquence d'exercices pouvait être proposée et sa lisibilité pour les médecins. Le déroulement du programme et les solutions sont explicables ce qui permet d'ajouter ou de faire évoluer des règles pour être au plus près des situations réelles des patients.

En outre, l'application est parfaitement conforme à la gestion des données privées, aucune donnée personnelle n'étant nécessaire pour générer des séances (en effet, le genre, l'âge ou le poids, par exemple, n'apporte en réalité aucune information médicalement utile quand on dispose des réponses aux questions posées). Cette approche permet donc de construire cette base de données inédites à partir de laquelle l'algorithme pourra devenir encore plus pertinent dans ses propositions d'exercices.

La structure des termes Prolog a été imaginée en anticipant la

prise en compte d'une évolution vers d'autres pathologies ultérieures. L'interface utilisateur est conçue en PHP et la communication entre PHP et Prolog s'effectue via un JSON. Les exercices sont classés comme des faits Prolog standards et organisés par famille et leur éligibilité potentielle dépend du jour courant, de la présence ou non de matériel spécifique ou de la capacité du patient à effectuer certains tests physiologiques :

```
exoeligible(Patient, cheville, J, i1, _) :-
    J >= 15,
    exercicesCumules(Patient, cheville, _,
ListeExo),
    comptemembre(h, ListeExo, Num),
    Num >= 3,

questiontest(Patient, cheville, J, coussin, _, o, _).

exoeligible(Patient, cheville, J, ExoFamilleK, _) :-
    J >= 21,

questiontest(Patient, cheville, _, sport, _, o, _),

questiontest(Patient, cheville, _, qf11, _, Repqf11, _),
    Repqf11 \= a,

questiontest(Patient, cheville, _, qf12, _, Repqf12, _),
    Repqf12 \= a,

questiontest(Patient, cheville, _, qf13, _, Repqf13, _),
    Repqf13 \= a,
    exercice(cheville, k, _, ExoFamilleK, _, _).
```

Le générateur d'exercices proprement dit exploite ensuite une « capacité de la logique d'ordre 2 » de Prolog en recueillant tous les exercices potentiellement éligibles avec une commande bagof :

```
bagof(Exo, exoeligible(Patient, Pathologie, Jour,
Exo, _), ListeExo)
```

Le prédicat « exoeligible » détermine les situations d'applicabilité d'un exercice et est ainsi déclenché par « bagof » qui remplit la ListeExo de tous les Exos correspondant à un Patient donné pour le Jour courant.

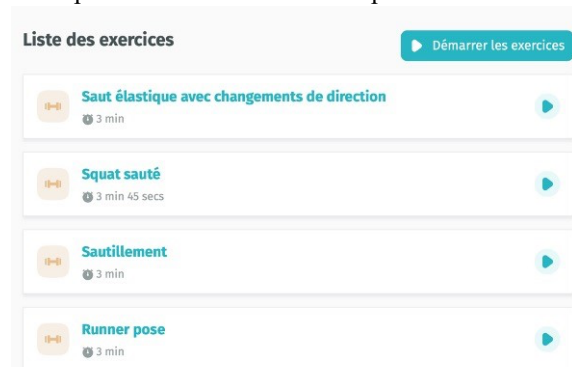


Figure 1: Exemples d'exercices proposés chez un patient peu douloureux avec évolution favorable de la douleur

La série d'exercices considérés comme éligibles est ensuite filtrée par des règles supplémentaires (comme, par exemple, la non-monotonie pour éviter une succession d'exercices identiques d'un jour à l'autre) afin de générer une séquence qui est transmise via JSON au module d'interface qui affiche les exercices de la journée (voir Figure 1).

Dans l'extrait ci-dessus, on voit que la pathologie est déjà anticipée comme pouvant avoir une autre valeur que « cheville », le système ayant été étendu à 12 pathologies ostéoarticulaires.

Pour chaque pathologie, des jeux de données synthétiques ont été générées puis confrontés aux règles du moteur Prolog, les séquences d'exercices produites ayant été contrôlées par l'équipe médicale.

L'application mise à disposition des patients reste sous contrôle médical, le praticien prescripteur pouvant suivre via une interface dédiée l'évolution de la pathologie et le respect du protocole proposé. Dans les cas où la pathologie évoluerait défavorablement, l'application suggère une visite médicale.

5 Évolution vers d'autres pathologies et perspectives

Confrontés à des pathologies pour lesquelles il n'existe que peu de jeux de données permettant de construire des modèles précis d'évolution de celles-ci, nous avons adopté une approche consistant à implémenter des règles reconnues par les praticiens. Le moteur de génération d'exercices a été conçu tel que d'autres pathologies ont pu être aisément intégrées.

Prolog nous a permis d'avoir une démarche incrémentale en complétant ainsi progressivement le moteur de règles spécifiques à chaque pathologie en ayant la certitude ne de pas interférer avec les autres et en garantissant la stricte application de ces règles.

Le modèle mathématique sous-jacent confirme la complexité de la génération d'une séquence d'exercices, l'espace étant fortement combinatoire.

Recov'up propose donc une solution innovante pour la prise en charge de problèmes de santé publique. En exploitant des publications scientifiques et des règles médicales opérationnelles, nous avons conçu une application d'Intelligence Artificielle originale, frugale sur le plan de la donnée, dont l'explicabilité facilite l'adoption par les professionnels de santé.

L'expérience utilisateur a été pensée pour favoriser un usage régulier de l'application permettant ainsi le suivi de l'évolution de la pathologie. Cette collecte de données directement auprès du patient offre alors l'opportunité d'envisager des évolutions basées sur d'autres modèles d'Intelligence Artificielle.

6 Références

- [1] Avis de la CMEDiMTS, 2018, [https://www.has-sante.fr/upload/docs/evamed/CEPP-5487_A2T_15_mai_2018_\(5487\)_avis.pdf](https://www.has-sante.fr/upload/docs/evamed/CEPP-5487_A2T_15_mai_2018_(5487)_avis.pdf).
- [2] R. M. Van Rijn, A. G. Van Os, R. M. Bernsen, P. A. Luijsterburg, B. W. Koes, and S. M. Bierma-Zeinstra, What is the clinical course of acute ankle sprains? A systematic literature review, *The American journal of medicine*, Vol. 121, no 4, pp. 324-331, 2008.
- [3] H. Polzer, K. G. Kanz, W. C. Prall, F. Haasters, B. Ockert, W. Mutschler, and S. Grote, Diagnosis and treatment of acute ankle injuries: development of an evidence-based algorithm, *Orthopedic reviews*, Vol. 4, no 1, 2012.

- [4] J. Wagemans, C. Bleakley, J. Taeymans, *et al.*, Rehabilitation strategies for lateral ankle sprain do not reflect established mechanisms of re-injury: A systematic review, *Physical Therapy in Sport*, 2023.
- [5] M. D. Hupperets, E. A. Verhagen, and Van W. Mechelen, Effect of unsupervised home based proprioceptive training on recurrences of ankle sprain: randomised controlled trial, *Bmj*, Vol. 339, 2009.
- [6] F. Fatoye, T. Gebrye, C. Fatoye, *et al.*, The Clinical and Cost-Effectiveness of Telerehabilitation for People With Nonspecific Chronic Low Back Pain: Randomized Controlled Trial, *Journal of Medical Internet Research mHealth uHealth*, Vol. 8, no 6, 2020
- [7] N. Itoh, H. Mishima, Y. Yoshida, *et al.*, Evaluation of the Effect of Patient Education and Strengthening Exercise Therapy Using a Mobile Messaging App on Work Productivity in Japanese Patients With Chronic Low Back Pain: Open-Label, Randomized, Parallel-Group Trial, *Journal of Medical Internet Research mHealth uHealth*, Vol. 10, no 5, 2022
- [8] E. T. Chen, K. C. Mcinnis, and J. Borg-Stein, Ankle sprains: evaluation, rehabilitation, and prevention, *Current sports medicine reports*, Vol. 18, no 6, pp. 217-223, 2019.
- [9] M. C. Hoch, J. Hertel, P. A. Gribble, *et al.*, Effects of foot intensive rehabilitation (FIRE) on clinical outcomes for patients with chronic ankle instability: a randomized controlled trial protocol, *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, Vol. 15, no 1, pp. 1-13, 2023.
- [10] A.C. Pijnenburg, C. N. Van Dijk, P. M. Bossuyt, and R. K. Marti, Treatment of ruptures of the lateral ankle ligaments: a meta-analysis, *J Bone Joint Surg Am*, Vol. 82, no 6, pp. 761-773, 2000.
- [11] P.A. Gribble, *et al.*, 2016 consensus statement of the International Ankle Consortium: prevalence, impact and long-term consequences of lateral ankle sprains, *British journal of sports medicine*, Vol. 50, no 24, pp. 1493-1495, 2016.
- [12] Actualisation 2004 de la conférence de consensus l'entorse de cheville au service d'urgence, 5ème conférence de consensus, https://www.sfmu.org/upload/consensus/actualisation_entorse.pdf.