

Conduite d'expertise d'un Système Expert d'Ordre 0+

Aide à la décision en Orthopédie Dento-Faciale
TP02 - Intelligence Artificielle Symbolique

Étudiant(e) XYZ

Étudiant(e) ABC

Janvier 2026

Table des matières

0.1	Introduction	2
0.1.1	Contexte et Problématique	2
0.1.2	Justification du Système Expert d'Ordre 0+	2
0.2	Base de Connaissances	2
0.2.1	Formalisation des Règles	2
0.2.2	Arbre de Dédution (Simplifié)	2
0.3	Implémentation en Common Lisp	3
0.3.1	Représentation des Connaissances	3
0.3.2	Moteur d'Inférence : Chaînage Avant	3
0.3.3	Fonctions de Service	4
0.4	Utilisation de l'IA Générative	4
0.4.1	Documentation des Prompts	4
0.5	Scénarios et Résultats	4
0.5.1	Scénario Clinique : Classe II Division 1	4
0.5.2	Tests de Robustesse	5
0.6	Glossaire Technique	5
0.6.1	Termes d'Orthodontie	5
0.6.2	Concepts d'Intelligence Artificielle Symbolique	6
0.6.3	Structures de Données et Implémentation Lisp	7
0.7	Conclusion et Perspectives	8

0.1 Introduction

0.1.1 Contexte et Problématique

L'Orthopédie Dento-Faciale (ODF), communément appelée orthodontie, est une discipline complexe nécessitant l'intégration de multiples paramètres cliniques (squelettiques, dentaires, esthétiques) pour établir un diagnostic et un plan de traitement.

La problématique traitée dans ce projet est la création d'un système d'aide à la décision pour la **sélection du type d'appareil orthodontique** chez l'enfant et l'adulte. Face à la multitude de dispositifs existants (fonctionnels, fixes, aligneurs, etc.), le risque d'erreur de diagnostic ou de mauvaise indication thérapeutique est réel pour un praticien débutant.

0.1.2 Justification du Système Expert d'Ordre 0+

Le choix d'un système expert d'ordre 0+ (logique propositionnelle étendue aux prédicats simples, sans gestion d'incertitude probabiliste type Bayes) se justifie par la nature des classifications orthodontiques :

- **Déterminisme des classifications** : Les classes d'Angle (I, II, III) sont définies par des critères géométriques stricts (ANGLE, 1899).
- **Protocoles standardisés** : Les recommandations de la Haute Autorité de Santé (HAUTE AUTORITÉ DE SANTÉ, 2002) fournissent des arbres de décision clairs (ex : Si $ANB < 0$ alors Classe III).
- **Absence de temps réel** : Le diagnostic se fait sur des données statiques (radiographies, mesures cliniques) à un instant t .

Ce système permet donc de formaliser le raisonnement clinique de manière explicite et vérifiable.

0.2 Base de Connaissances

0.2.1 Formalisation des Règles

La base de connaissances a été construite à partir d'une analyse bibliographique rigoureuse. Elle est divisée en trois modules : Diagnostic, Appareillage, et Contre-indications.

Voici quelques exemples de règles formalisées (SI ... ALORS ...) :

- **Règle R-A2 (Diagnostic Classe II)** : SI *Relation Molaire* = Classe 2 ET *Incisives Maxillaires* = proclinées ET *Overjet* > 5mm
ALORS *Diagnostic* = Classe II division 1 (THIRUVENKATACHARI et al., 2017).
- **Règle R-B3 (Masque Facial)** : SI *Diagnostic* = Classe III squelettique ET *Âge* entre 6 et 9 ans ET *Rétromaxillie* = Vrai
ALORS *Appareil* = Masque de Delaire (OWENS et al., 2024).
- **Règle R-C1 (Contre-indication Parodontale)** : SI *Parodontite* = Active OU *Perte d'attache* > 50%
ALORS *Traitement* = Contre-indiqué (PROFFIT et al., 2018).

0.2.2 Arbre de Dédution (Simplifié)

Le raisonnement suit une logique en cascade :

1. **Niveau 1 (Squelettique/Dentaire)** : Analyse des mesures céphalométriques (ANB, Wits) et cliniques → *Diagnostic*.
2. **Niveau 2 (Thérapeutique)** : Croisement du *Diagnostic* avec l'Âge, la *Coopération* et la *Croissance* → *Appareil*.
3. **Niveau 3 (Sécurité)** : Vérification des limites (Parodonte, limites techniques) → *Contre-indications* ou *Accessoires*.

0.3 Implémentation en Common Lisp

0.3.1 Représentation des Connaissances

Nous avons opté pour l'utilisation de structures ('defstruct') pour représenter les faits et les règles, offrant une meilleure lisibilité que les listes simples.

```

1 (defstruct fait
2   attribut    ; Symbole (ex: 'age)
3   valeur      ; Valeur (ex: 12)
4   source      ; :utilisateur ou :deduit
5 )
6
7 (defstruct regle
8   id          ; Identifiant
9   premisses   ; Liste ((attribut operateur valeur)...)
10  conclusions ; Liste ((attribut valeur)...)
11  (active t)   ; Gestion de l'activation
12 )

```

Listing 1 – Structure des données en Lisp

0.3.2 Moteur d'Inférence : Chaînage Avant

Le choix s'est porté sur un moteur en ****chaînage avant**** (dirigé par les données). En diagnostic médical, nous partons des symptômes (faits observés) pour en déduire une pathologie (nouveaux faits).

Le moteur fonctionne par saturation de la base de faits ('*base-faits*').

```

1 (defun chainage-avant ()
2   (loop while nouveau-fait-trouve do
3     (dolist (r *base-regles*)
4       (when (regle-active r)
5         ;; Verification des premisses avec evaluer-condition
6         (if (conditions-ok)
7             (progn
8               (ajouter-nouveaux-faits)
9               (desactiver-regle r))))))

```

Listing 2 – Extrait du moteur de saturation

Une particularité de notre implémentation est la fonction 'evaluer-condition' qui gère des opérateurs de comparaison complexes ('>', '<', 'member', 'equal'), dépassant le simple ordre 0 binaire.

0.3.3 Fonctions de Service

Le système inclut des fonctions robustes pour :

- ‘ajouter-fait’ : Vérifie l’unicité avant l’insertion.
- ‘charger-regles’ : Initialise la base avec 15 règles métier.
- ‘reinitialiser-base’ : Vide la mémoire de travail pour un nouveau patient.

0.4 Utilisation de l’IA Générative

Conformément aux consignes, l’IA (modèle Gemini) a été utilisée comme "Technicien Lisp" tandis que l’étudiant a agi comme "Expert Orthodontiste".

0.4.1 Documentation des Prompts

- **Prompt initial** : Définition du rôle et contrainte "Attends ma base de règles".
- **Apport de l’IA** :
 - Structuration du code Lisp (séparation Modèle / Vue / Contrôleur).
 - Écriture de la fonction récursive de chaînage arrière (‘verifier-but’) pour comparaison.
 - Génération des scénarios de tests unitaires (‘test-edge-cases’).
- **Vérification humaine** : Correction par l’étudiant de la logique des règles ‘R-A4’ (valeurs ANB négatives pour la classe III) mal interprétées initialement par l’IA.

0.5 Scénarios et Résultats

0.5.1 Scénario Clinique : Classe II Division 1

```
**Entrées Utilisateur :**
— Âge : 10 ans
— Relation Molaire : Classe 2
— Incisives Maxillaires : Proclinées
— Overjet : 6mm
— Coopération : Bonne
**Traces d’exécution :**

--- Cycle 1 ---
DÉCLENCHEMENT RÈGLE R-A2 : Classe II division 1 classique
[INFO] Nouveau fait établi : DIAGNOSTIC = CLASSE-2-DIV-1 (:deduit)

--- Cycle 2 ---
DÉCLENCHEMENT RÈGLE R-B1 : Twin Block ou Activateur
[INFO] Nouveau fait établi : APPAREIL = FONCTIONNEL (:deduit)
```

****Résultat :**** Le système recommande correctement un appareil fonctionnel, cohérent avec la littérature pour un patient en croissance (KORETSI et al., 2015).

0.5.2 Tests de Robustesse

- Le système a été soumis à des tests limites (fonction ‘test-edge-cases’ dans le code) :
- Gestion des âges limites (passage enfant/ado/adulte).
 - Données manquantes (le système répond "Diagnostic indéterminé" sans planter).
 - Boucles infinies évitées par le flag ‘active’ dans la structure ‘regle’.

0.6 Glossaire Technique

Ce glossaire explicite les termes essentiels à la compréhension du système expert orthodontique développé. Il couvre trois domaines : l’orthodontie clinique, l’intelligence artificielle symbolique, et l’implémentation en Common Lisp.

0.6.1 Termes d’Orthodontie

Classes d’Angle (I, II, III) Classification squeletto-dentaire fondamentale basée sur la relation entre la première molaire maxillaire et mandibulaire. **Classe I** : relation normale (neutre). **Classe II** : molaire mandibulaire reculée (rétrognathe). **Classe III** : molaire mandibulaire avancée (prognathe). Permet d’orienter le diagnostic (Règles R-A1 à R-A5, lignes 59-88 du code Lisp).

Overjet Distance horizontale entre le bord des incisives supérieures et inférieures, mesurée en millimètres. Valeur normale : 2-3mm. Un overjet > 5mm indique une Classe II Division 1 (Règle R-A2, ligne 67). Utilisé comme critère diagnostique pour différencier les subdivisions de Classe II.

Overbite Distance verticale de recouvrement des incisives supérieures sur les inférieures. Un overbite > 4mm associé à des incisives rétroclinées caractérise une Classe II Division 2 avec "Deep Bite" (Règle R-A3, ligne 73). Indique un risque de traumatisme palatin.

ANB (Angle Nasal-Basion) Mesure céphalométrique fondamentale calculée sur une téléradiographie de profil. Angle formé par les points A (base du maxillaire), N (nasion) et B (base de la mandibule). **Valeur normale** : 2° à 4°. $ANB > 4 =$ Classe II squelettique. $ANB < 0 =$ Classe III squelettique (Règle R-A4, ligne 79, condition (`anb < 0`)). Permet de différencier les malocclusions dentaires des malocclusions squelettiques.

Wits (Appraisal) Alternative au ANB pour évaluer les décalages squelettiques. Mesure la projection des points A et B sur le plan occlusal. Valeur normale homme : -1mm, femme : 0mm. Un Wits < -2mm confirme une Classe III squelettique "vraie" (Règle R-A4, ligne 79, condition (`wits < -2`)). Plus fiable que l’ANB chez les patients à croissance verticale.

Rétromaxillie Insuffisance de développement du maxillaire supérieur (os de la mâchoire supérieure). Pathognomonique de la Classe III squelettique. Justifie l’usage d’un masque de traction faciale (Delaire) pour stimuler la croissance maxillaire avant 9 ans (Règle R-B3, ligne 117, condition (`retromaxillie equal t`)).

Encombrement dentaire Manque de place disponible sur l’arcade pour aligner toutes les dents. Mesuré en millimètres (somme des discordances de chaque dent). Encombrement ≤ 4 mm = mineur (alignement possible par stripping). Encombrement

> 6mm = extraction nécessaire. Utilisé pour différencier une Classe I mineure (R-A1, ligne 59) d'une Classe I sévère.

Disjoncteur (Expansion Rapide du Maxillaire) Appareil orthopédique fixé au palais pour élargir transversalement l'arcade maxillaire (ouverture de la suture médio-palatine). Indiqué chez l'enfant < 14 ans en cas d'arcade étroite avec béance latérale (Règle R-B5, ligne 131). Impossible chez l'adulte (suture soudée).

Masque de Delaire (Traction Extraorale Inversée) Appareil de traction faciale antérieure fixé sur un casque frontal et mentonnier. Stimule la croissance du maxillaire vers l'avant. Strictement réservé aux Classe III squelettiques jeunes (6-9 ans) avec rétromaxillie confirmée radiologiquement (Règle R-B3, ligne 117). Efficacité controversée après 10 ans.

Contention Phase de maintien des résultats orthodontiques après dépose des appareils actifs. **Contention fixe** : fil métallique collé sur la face linguale des dents (canine à canine), indiquée si antécédent d'encombrement (Règle R-B7, ligne 143). **Contention amovible** : gouttière thermoformée portée la nuit (Règle R-B8, ligne 149). Durée minimale : 2 ans, idéalement à vie.

0.6.2 Concepts d'Intelligence Artificielle Symbolique

Système Expert d'Ordre 0+ Système à base de connaissances utilisant la logique propositionnelle étendue. **Ordre 0** : pas de variables ni de quantificateurs (contrairement à la logique du premier ordre). Le "+" indique l'usage de prédicats simples (>, <, =) et d'opérateurs ensemblistes (**member**), dépassant la logique booléenne pure. Adapté aux domaines avec classifications déterministes comme l'orthodontie.

Base de Faits (Working Memory) Ensemble dynamique des connaissances avérées à un instant *t* sur le patient. Représentée par la variable globale ***base-faits*** (ligne 24). Chaque fait est une structure (**attribut valeur source**) (lignes 6-10). Exemple : (**age 10 :utilisateur**). Évolue par saturation lors de l'exécution du moteur.

Base de Règles (Production Rules) Ensemble statique des connaissances expertes formalisées sous forme SI...ALORS. Représentée par ***base-regles*** (ligne 27). Chargée une seule fois au démarrage via **charger-regles()** (ligne 50). Chaque règle possède un identifiant unique (ex : R-A2), des prémisses (conditions) et des conclusions (nouveaux faits déduits).

Chaînage Avant (Forward Chaining) Stratégie d'inférence dirigée par les **données**. Part des faits connus (symptômes) pour déduire de nouveaux faits (diagnostic, traitement) par application itérative des règles. Implémenté dans la fonction **chainage-avant()** (lignes 200-226). **Justification du choix** : Mimétisme du raisonnement clinique médical (des signes vers la pathologie). Opposé au chaînage arrière (dirigé par les buts).

Chaînage Arrière (Backward Chaining) Stratégie alternative dirigée par les **buts**. Part d'une hypothèse à prouver (ex : "Le patient a-t-il une Classe II ?") et remonte vers les faits nécessaires. Implémenté à titre comparatif dans **verifier-but()** (lignes 229-248). **Non utilisé en production** car moins intuitif pour l'interaction médecin-patient (qui fournit spontanément des symptômes, pas des hypothèses).

Saturation de la Base de Faits Processus itératif du chaînage avant consistant à appliquer toutes les règles activables jusqu'à ce qu'aucun nouveau fait ne soit déduit. Détecté par le drapeau `nouveau-fait-trouve` (ligne 202). **Garantie de terminaison** : chaque règle est désactivée après déclenchement via (`active nil`) (ligne 223), empêchant les boucles infinies. Nombre de cycles moyen : 2-3 pour un diagnostic simple.

Règle de Production (Production Rule) Formalisme de connaissance SI (prémises) ALORS (conclusions). Structure Lisp `defstruct regle` (lignes 12-20). **Prémises** : liste de conditions ((`attribut operateur valeur`)...). **Conclusions** : liste de nouveaux faits ((`attribut valeur`)...). **Facteur de confiance (CF)** : informatif uniquement (pas d'inférence bayésienne). Exemple : R-A2 (ligne 64) encode "SI relation-molaire=Classe-2 ET incisives-max=proclinées ET overjet>5 ALORS diagnostic=Classe-2-Div-1 (CF=0.90)".

Gestion des Conflits (Conflict Resolution) Mécanisme pour choisir quelle règle déclencher lorsque plusieurs sont activables simultanément. Notre système utilise un ordre de priorité **implicite basé sur l'ordre de définition des règles** (ordre de la liste `*base-regles*`, ligne 166 `nreverse`). Les règles diagnostiques (module A) sont chargées avant les règles thérapeutiques (module B), garantissant qu'un diagnostic soit établi avant la sélection d'un appareil.

Évaluation de Conditions Fonction `evaluer-condition()` (lignes 183-197) qui vérifie si une condition est satisfaite. Gère 6 opérateurs : `equal` (égalité symbolique), `>`, `<`, `>=`, `<=` (comparaisons numériques), `member` (appartenance à une liste). Retourne : `inconnu` si l'attribut n'est pas dans la base, permettant de distinguer "faux" de "non encore évalué".

0.6.3 Structures de Données et Implémentation Lisp

Structure `defstruct` Macro Common Lisp créant un type de données structuré avec accesseurs automatiques. Utilisée pour `fait` (ligne 6) et `regle` (ligne 12). Avantages sur les listes simples : clarté sémantique, typage, performances d'accès ($O(1)$ vs parcours). Génère automatiquement des fonctions `make-fait`, `fait-attribut`, `fait-valeur`, `regle-premises`, etc.

Fonction `valeur-fait` Recherche si un attribut existe dans `*base-faits*` (ligne 32). Utilise `find` avec `:key #'fait-attribut` pour comparer uniquement les attributs. Retourne le **fait complet** (structure) si trouvé, `nil` sinon. **Correction effectuée** : version initiale était récursive (risque de stack overflow), remplacée par une version itérative avec `find`.

Fonction `ajouter-fait` Ajoute un nouveau fait à la base si l'attribut n'existe pas déjà (ligne 35). Utilise `push` pour insertion en tête ($O(1)$). Trace l'ajout via `format` pour débogage. **Paramètre source** : `:utilisateur` pour faits saisis, `:deduit` pour faits inférés (ligne 37). Permet de distinguer les données primaires des conclusions pour l'explicabilité.

Fonction `reinitialiser-base` Vide la mémoire de travail et réactive toutes les règles (lignes 41-45). Utilise `setf` pour affecter `nil` à `*base-faits*` et restaure (`regle-active r`) `t` pour chaque règle. **Indispensable** entre deux consultations pour éviter la contamination des données entre patients. Appelée au début de chaque test unitaire.

Moteur d'Inférence chainage-avant Boucle loop `while` (lignes 200-226) qui itère tant que `nouveau-fait-trouve` est vrai. À chaque cycle : parcourt toutes les règles actives, évalue leurs prémisses, déclenche celles dont toutes les conditions sont vraies, ajoute les conclusions, désactive la règle. **Complexité** : $O(n \times m)$ où n = nombre de règles, m = nombre de cycles (en pratique < 5). Affiche les traces pour pédagogie ("DÉCLENCHEMENT RÈGLE...").

Gestion du Flag active Attribut booléen dans `defstruct regle` (ligne 19, valeur par défaut `t`). Permet de **désactiver une règle après son déclenchement** (ligne 223 : `setf (regle-active r) nil`). **Rôle critique** : empêche qu'une règle soit appliquée plusieurs fois (ex : R-A2 ajouterait indéfiniment le même diagnostic). Alternative aux systèmes à "retraction" (RETE).

Tests Unitaires Automatisés Fonctions de tests robustes (lignes 370-700) : `test-edge-cases` (cas limites d'âge, valeurs numériques), `test-scenarios-complexes` (contre-indications, options multiples), `test-performance-stabilite` (détection de boucles infinies, répétabilité). Utilisent des assertions implicites avec `format` pour afficher les réussites (OK) ou échecs (ERREUR). La fonction `test-integration-complet` (lignes 619-700) vérifie individuellement chaque règle avec un score de réussite.

Fonction poser-questions-base Interface en mode texte pour la collecte des données initiales (lignes 251-268). Utilise `read` pour lire les entrées utilisateur. Ajoute chaque donnée comme fait avec source : `utilisateur`. **Limitation** : pas de validation des entrées (un utilisateur peut saisir `classe-4`, invalide). Amélioration possible : fonction de vérification de domaine.

Opérateur member Opérateur spécial dans `evaluer-condition` (ligne 194) pour tester l'appartenance. Permet des règles avec conditions disjonctives. Exemple : Règle R-A6 (ligne 95) : `(diagnostic member (classe-2-squelettique classe-3-squelettique))` est vraie si le diagnostic est **soit** Classe II **soit** Classe III squelettique. Évite de dupliquer des règles quasi-identiques.

Facteur de Confiance (CF) Attribut `:cf` dans `defstruct regle` (ligne 17). Valeur entre 0 et 1 représentant la certitude de la règle selon la littérature scientifique. Exemples : R-A2 (CF=0.90, ligne 68), R-B3 (CF=0.85, ligne 122). **Usage actuel** : purement informatif (affiché dans la description), non exploité pour l'inférence. **Extension possible** : calcul de certitudes propagées (modèle MYCIN avec formules de Shortliffe).

0.7 Conclusion et Perspectives

Le système expert développé répond au cahier des charges d'un SE d'ordre 0+. Il permet de valider la logique diagnostique en orthodontie sur des cas standards.

Limites :

- Rigidité des seuils (un overjet de 5.1mm déclenche la règle, 4.9mm non).
- Pas de gestion de l'incertitude (logique floue nécessaire pour les cas "borderline").

Améliorations futures :

- Implémentation d'un SE d'ordre 1 (avec variables) pour généraliser les règles dentaires (gauche/droite).
- Interface graphique pour la saisie des données céphalométriques.

Bibliographie

- ANGLE, E. H. (1899). Classification of malocclusion. *Dental Cosmos*, 41(2), 248-264.
- HAUTE AUTORITÉ DE SANTÉ. (2002). *Recommandations en Orthopédie Dento-Faciale - Rapport d'orientation* (rapp. tech.). HAS. Paris.
- KORETSI, V., ZYMPERDIKAS, V. F., PAPAGEORGIOU, S. N., & PAPADOPOULOS, M. A. (2015). Treatment effects of removable functional appliances in patients with Class II malocclusion : a systematic review and meta-analysis. *European Journal of Orthodontics*, 37(4), 418-434.
- OWENS, D., WATKINSON, S., HARRISON, J. E., TURNER, S., & WORTHINGTON, H. V. (2024). Orthodontic treatment for prominent lower front teeth (Class III malocclusion) in children. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 3(3), CD003451. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD003451.pub3>
- PROFFIT, W. R., FIELDS, H. W., & SARVER, D. M. (2018). *Contemporary Orthodontics* (6th). Elsevier Mosby.
- THIRUVENKATACHARI, B., HARRISON, J. E., WORTHINGTON, H. V., & O'BRIEN, K. D. (2017). Orthodontic treatment for prominent upper front teeth (Class II malocclusion) in children. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 11(11), CD003452. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD003452.pub4>