

Simulation prédictive de la Marche et du bénéfice fonctionnel Post Chirurgical dans la Paralysie Cérébrale (SiM-PC²)

Eric Desailly

PhD MKDE

Directeur du Pôle Recherche & Innovation Ellen Poidatz

Responsable de l'Unité d'Analyse du Mouvement du CRF Ellen Poidatz

La paralysie cérébrale (IMC)

Atteinte neurologique (incidence 2,4 pour mille)

- anomalies primaires : spasticité, défauts de commande musculaire, troubles de l'équilibre...
- anomalies secondaires : vices architecturaux, rétractions
- anomalies tertiaires : compensations

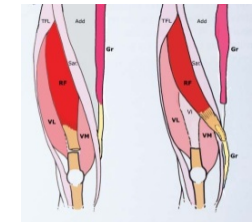
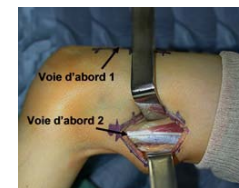


Troubles de la marche

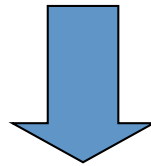


Traitements

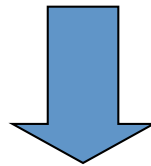
- Rééducation
- Chirurgie multi-étagée
 - Ostéotomie
 - Allongements musculotendineux
 - Transferts musculaires...
- Infiltration de toxine botulique
- Traitement orthopédique
- Ortho-prothèse



Maladie complexe + Traitements complexes



Décisions thérapeutiques difficiles

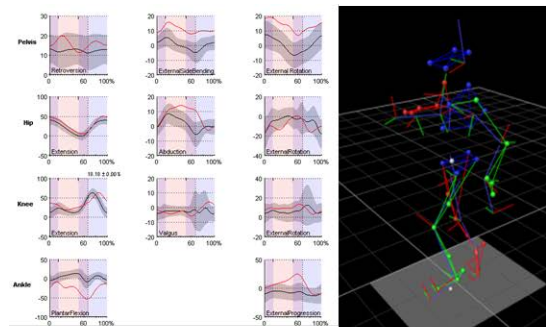


Analyse Quantifiée de la Marche (AQM)

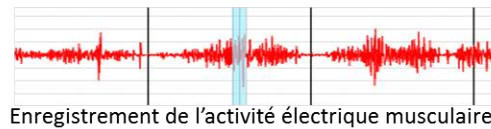
Unité d'Analyse du Mouvement

Equipe:

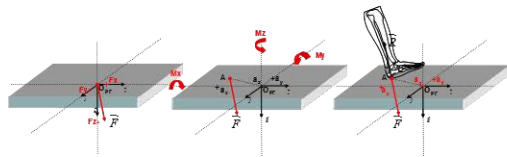
- Desailly Eric**
Responsable UNAM
- Khouri Nejib**
Chirurgien
- Badina Alina**
Chirurgien
- Mary Pierre**
Chirurgien
- Wicart Philippe**
Chirurgien
- Spirito Rossana**
Médecin
- Jarrige Michel**
Orthoprothésiste
- Lejeune Lionel**
Technicien
- Bouchacour Djilali**
IDE



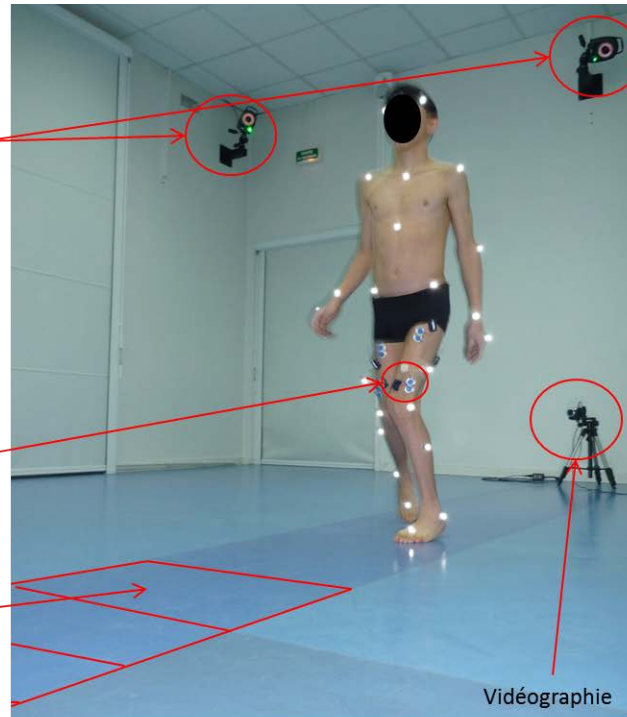
Capture des coordonnées 3D de marqueurs
Calcul de la cinématique articulaire 3D



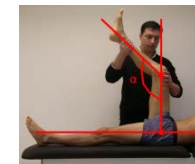
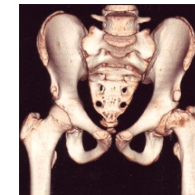
Enregistrement de l'activité électrique musculaire



Mesure des efforts d'interaction pied-sol
Calcul par dynamique inverse des efforts articulaires

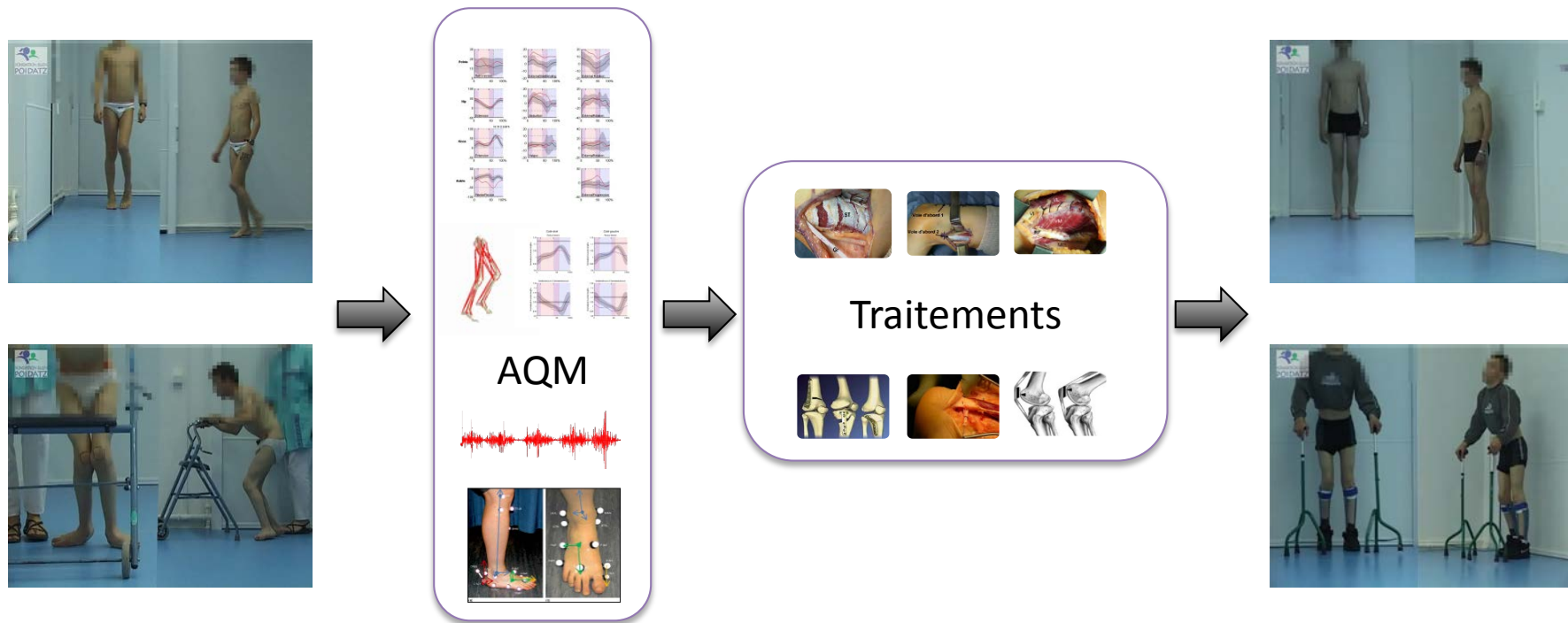


Vidéographie

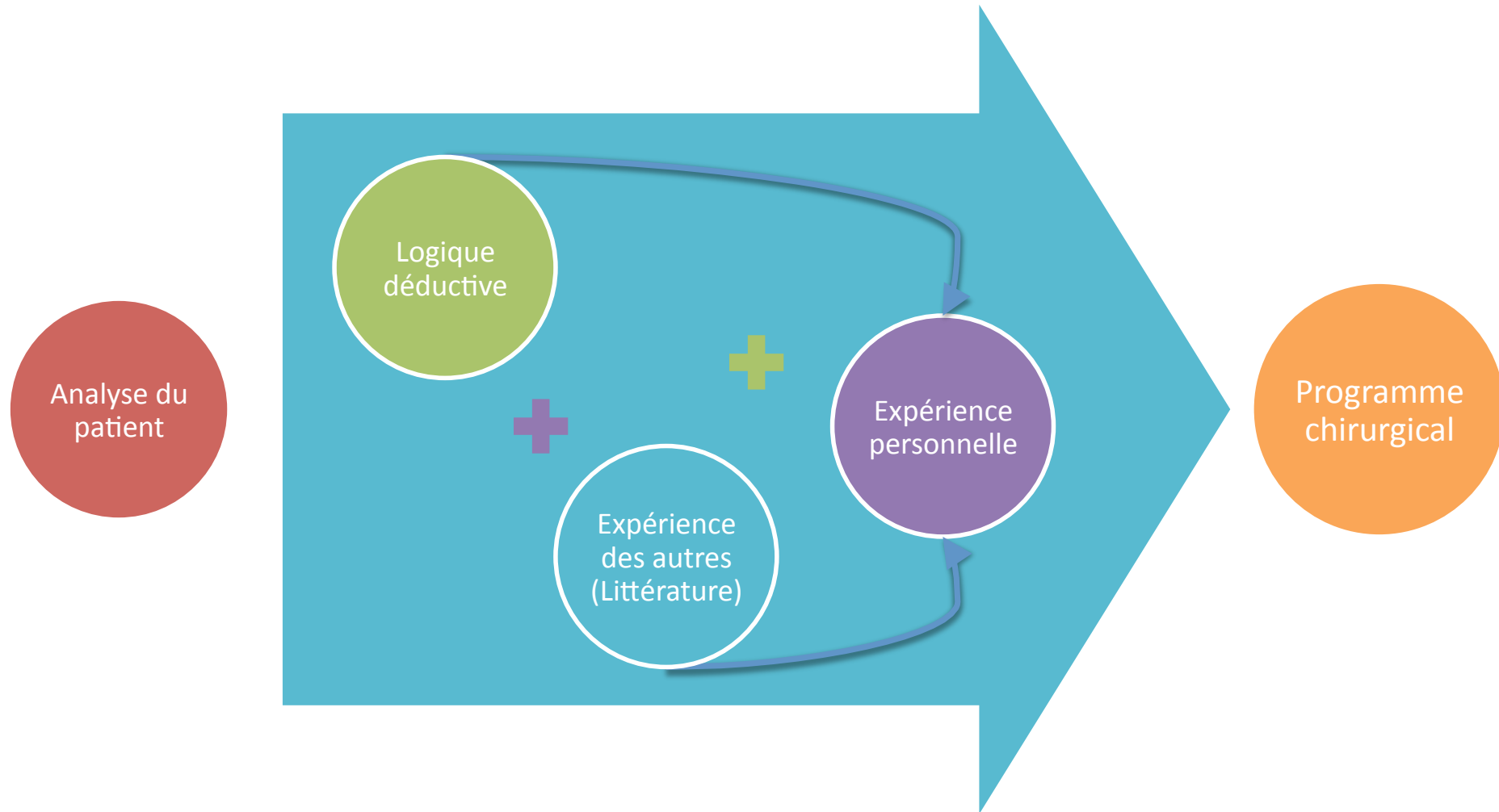


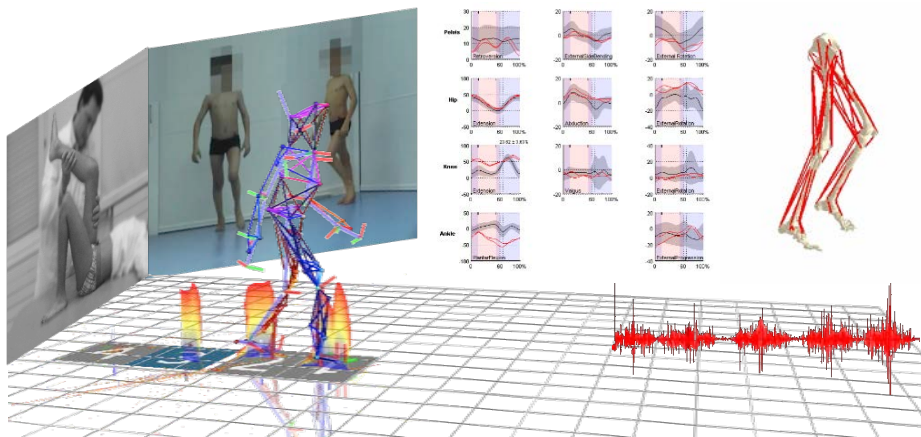
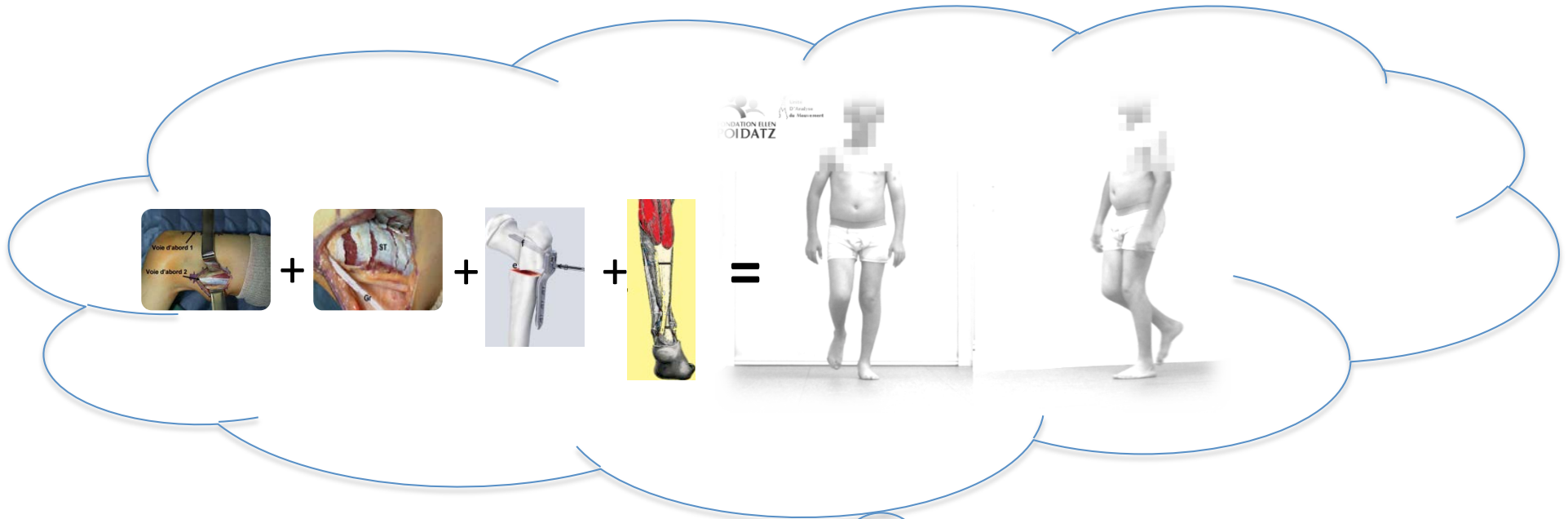
Expertise biomécanique de la locomotion pathologique par fusion de données multiples

Processus thérapeutique



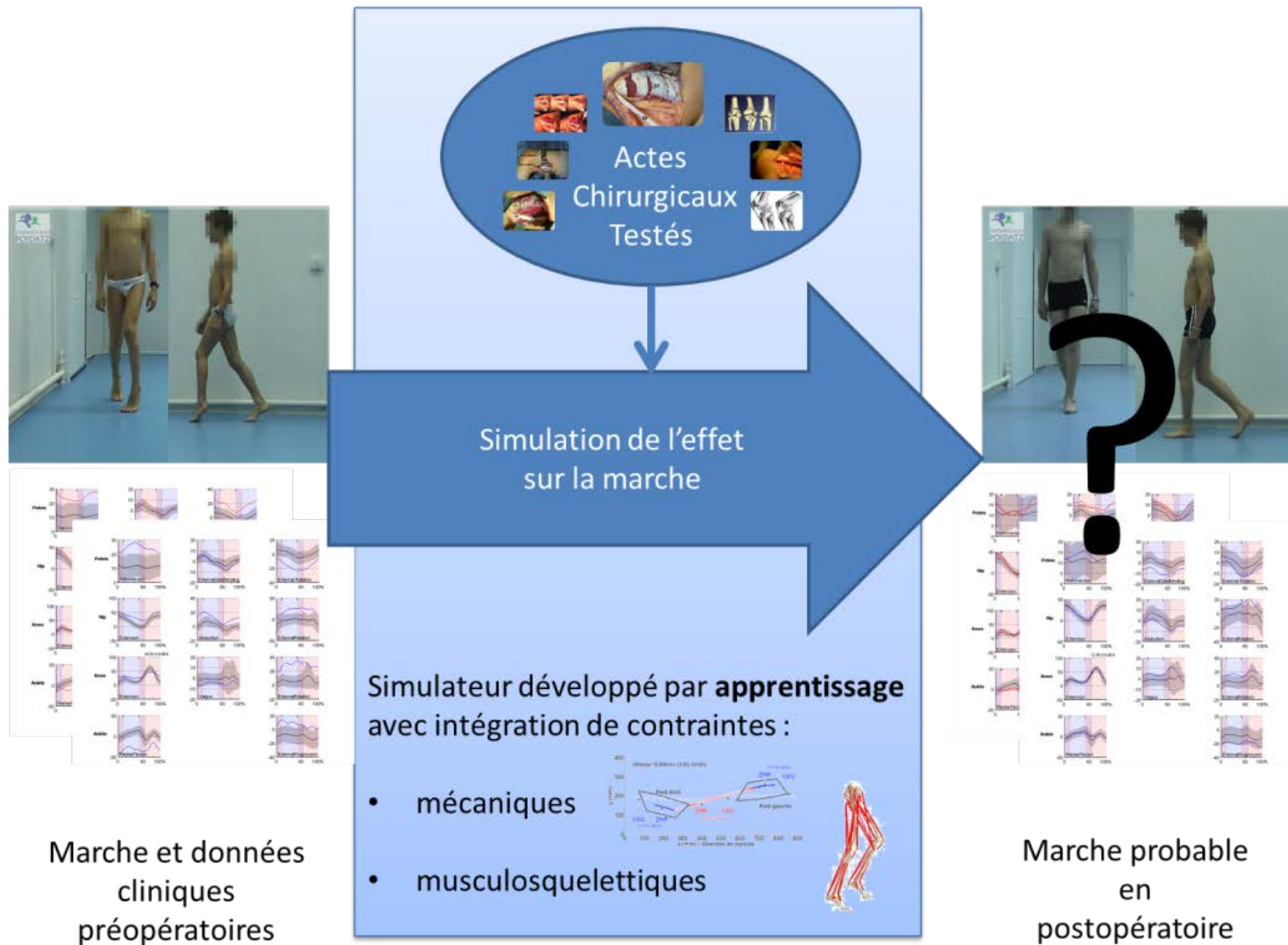
Comment est prise la décision ?



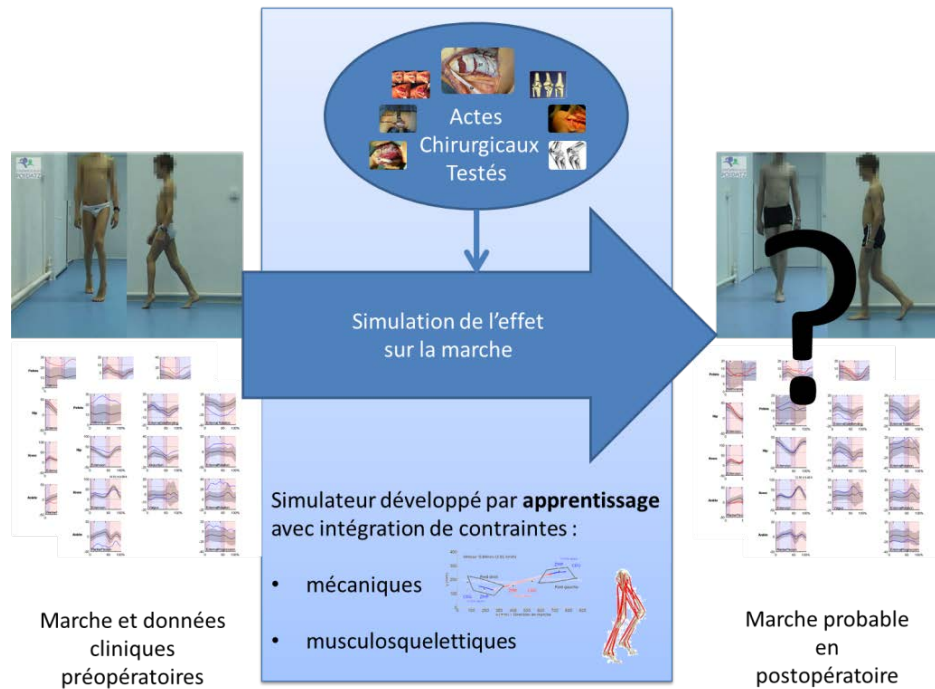


Projet SIM-PC²

Simulation prédictive de la Marche et du bénéfice fonctionnel Post Chirurgical dans la Paralysie Cérébrale (SiM-PC²)



Simulation prédictive de la Marche et du bénéfice fonctionnel Post Chirurgical dans la Paralysie Cérébrale (SiM-PC²)



2 thèses :

- Synthèse dynamique de la marche à l'échelle musculosquelettique
- Simulation des variations cinématiques par apprentissage

2 thèses de doctorat

Alexandra Pimenta Dos Santos

Master 2 en Mathématiques de la Modélisation
« Simulation dynamique de la marche des enfants et adolescents atteints de paralysie cérébrale »



Linear Quadratic Programming (LQP)

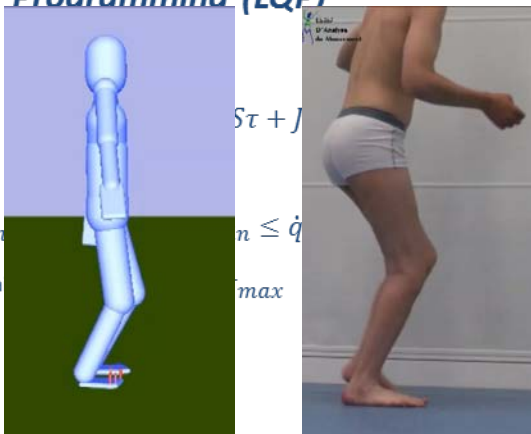
Contraintes d'égalité

Équations du Mouvement:

Contraintes d'inégalité

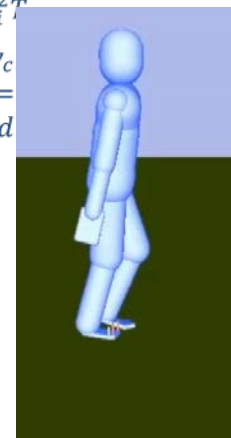
Limites articulaires:

Limites des moments articulaires:

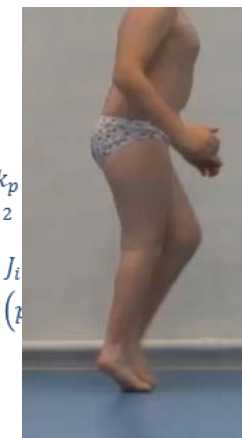


Marche pieds à plat

$$\begin{cases} \min_X \sum \alpha_i^2 T \\ X = [\dot{q}, w_c] \\ s. t. AX = b \\ CX \leq d \end{cases}$$



Marche en équin



$$\begin{aligned} & + k_p \|v_i^{ref} - v_i\|^2 \\ & + k_p \|v_i^{ref} - v_i - J_i \dot{q} + j_i \dot{q}\|^2 \end{aligned}$$

Prédiction statistique de l'effet de la chirurgie sur la marche de l'enfant et de l'adolescent atteint de paralysie cérébrale

O.A. Galarraga C.(1)(2), V. Vigneron(2), B. Dorizzi(3), N. Khouri(1)(4), E. Desailly(1)

(1) *Unité d'Analyse du Mouvement, Fondation Ellen Poidatz, St. Fargeau-Ponthierry, France*

(2) *Laboratoire IBISC, Université d'Evry Val d'Essonne, Evry, France*

(3) *Laboratoire SAMOVAR, Institut TELECOM SudParis, Evry, France*

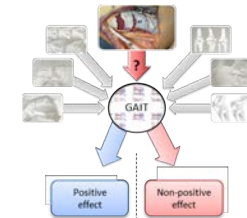
(4) *Hôpital universitaire Necker – Enfants Malades, Paris, France*

Etat de l'art

- **Prédictions qualitatives**

- Pour une procédure unique

- Allongement du psoas : Schwartz et al. (2013)
- Transfert du rectus femoris (RFT) : Reinbolt et al. (2009)
- Allongement des ischio-jambiers : Desailly et al. (2013)



- **Prédictions de paramètres cinématiques**

- Pour une procédure unique

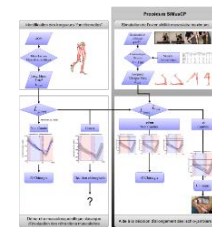
- RFT : Hersh et al. (1997), Sullivan et al. (1995)

- Pour une combinaison de chirurgies

- RFT et chirurgies associées: Niiler (2007)

- Pour un pattern de marche

- Crouch gait : Hicks et al. (2011)

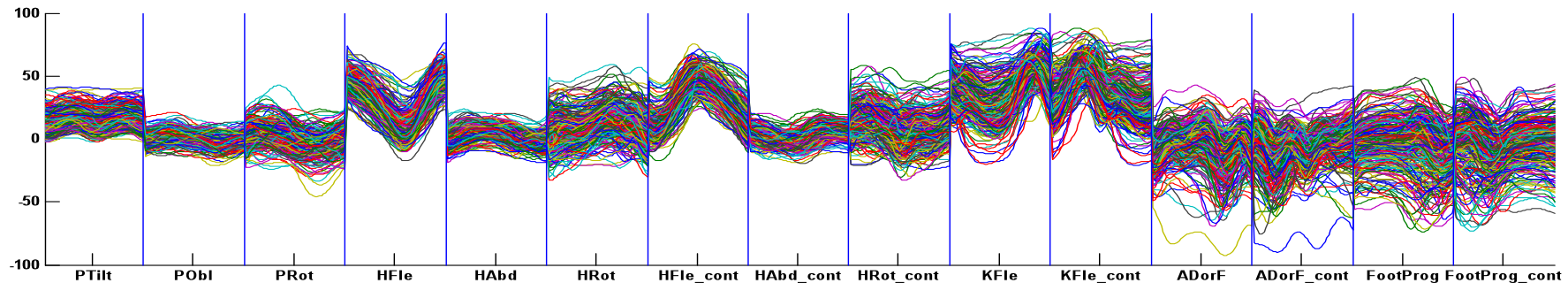


Objectif

Simuler l'effet de la chirurgie multisite et donc de la combinaison de multiples procédures sur la cinématique de la marche par des techniques d'apprentissage statistique (*machine learning*)

Données cinématiques et d'examen clinique

- 134 enfants PC avec AQM préopératoire et postopératoire
 - 15 angles cinématiques par membre inférieur



- Données cliniques
 - 36 paramètres (-20% de données manquantes)
 - Imputation des données manquantes avec algorithme IRMI (Templ, 2011)
 - K-Nearest Neighbors initialization (k=5)

15	10	
	20	25
25		15
20	10	15

➔

15	10	15
20	20	25
25	10	15
20	10	15

Données chirurgicales

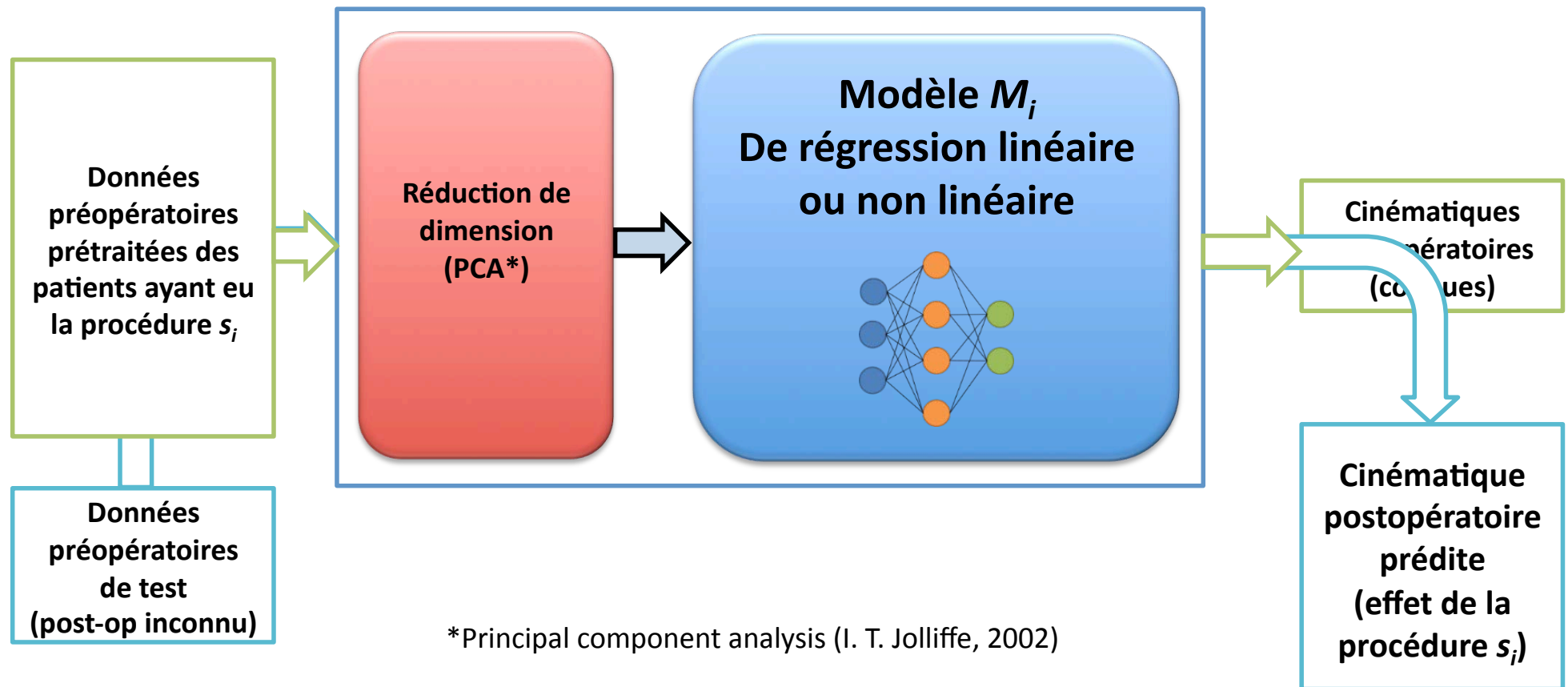
- 9 catégories de procédures chirurgicales :

Femoral derotational osteotomy	33%
Hip flexor release	23%
Rectus femoris transfer	48%
Hamstring lengthening	51%
Patella lowering	19%
Distal femoral osteotomy	10%
Tibial osteotomy	5%
Triceps lengthening	49%
Bony foot surgery	23%

- 80 combinaisons différentes (plus 511 “possibilités”)
- 4 procédures chirurgicale jamais isolées
- 3 membres en moyenne par combinaison chirurgicale (13 maximum)

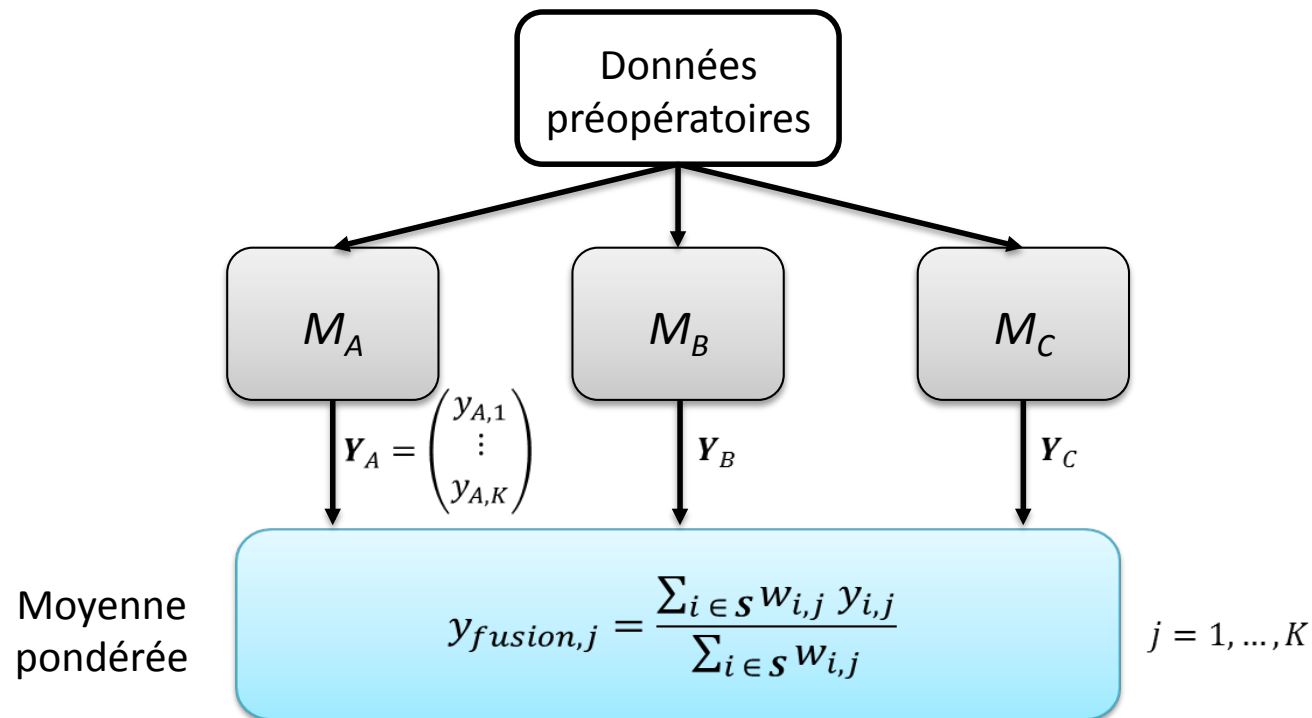
Un modèle M_i par chirurgie

- Pour chaque procédure s_i ...



Un modèle de fusion de modèles

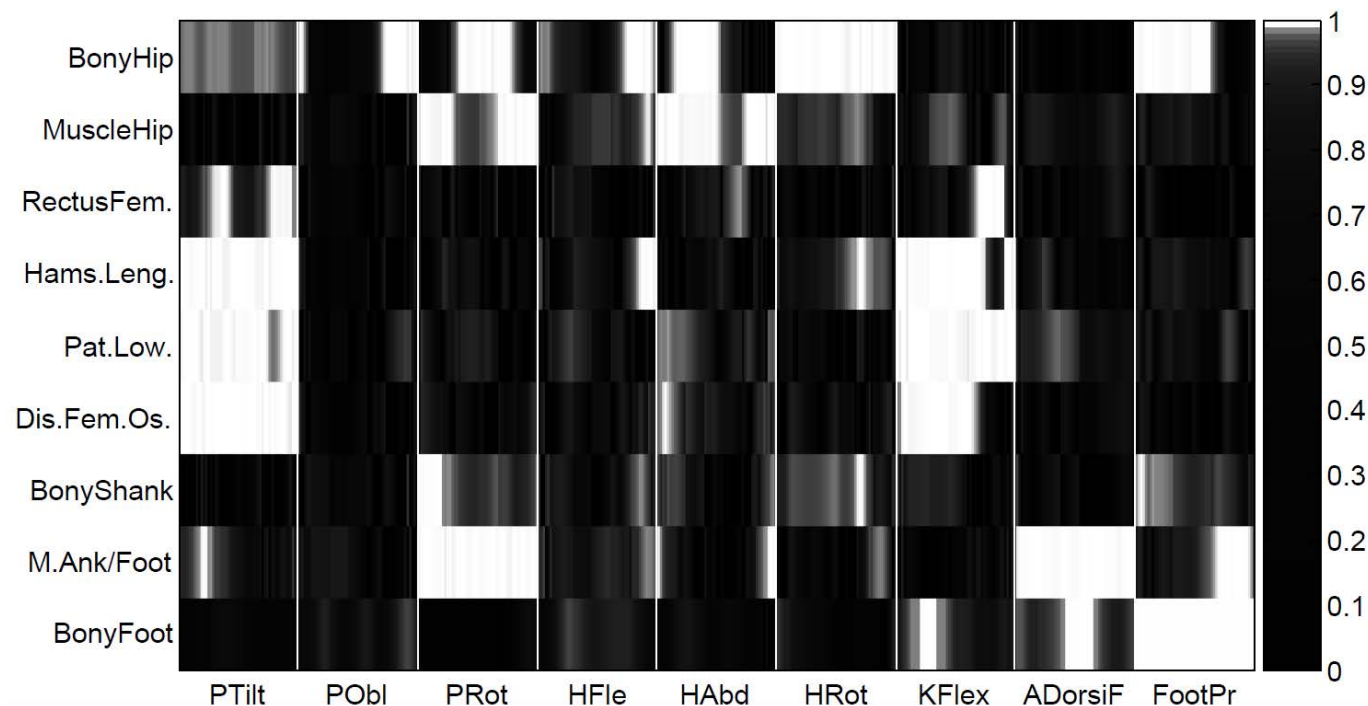
- Exemple: Chirurgie avec s_A , s_B and $s_C \iff S = \{A, B, C\}$
- Fusion des modèles de chacune de ces chirurgies ...



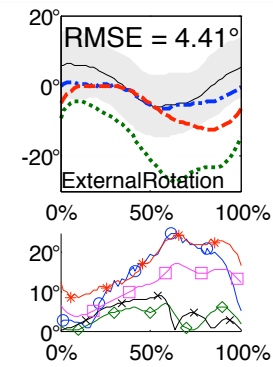
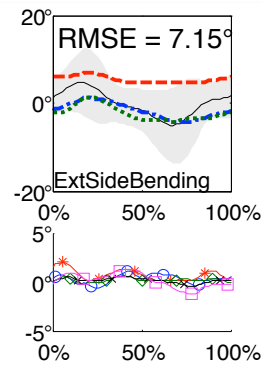
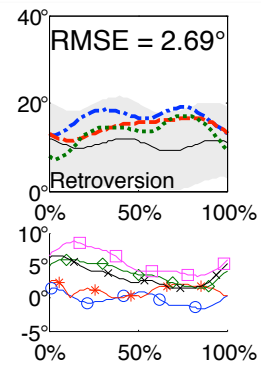
Choix des pondérations

- Significativité statistique de l'effet des interventions chirurgicales sur les variables cinématiques
- *t-test* entre les variations cinématiques des patients qui ont eu la procédure chirurgicale s_i et les patients qui n'ont pas eu s_i dans leur chirurgie

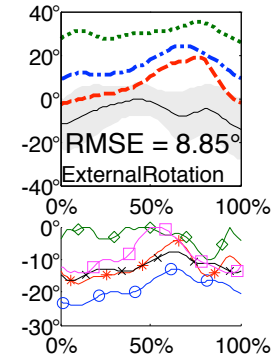
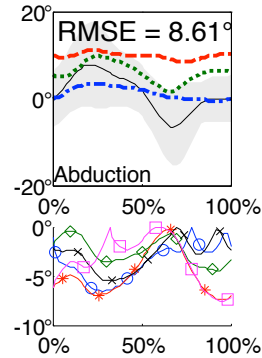
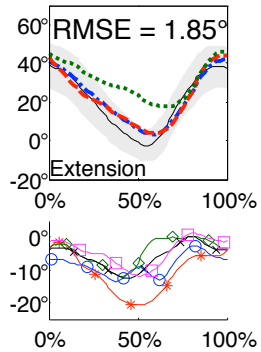
$$w_{i,k} = 1 - p_{i,k}$$



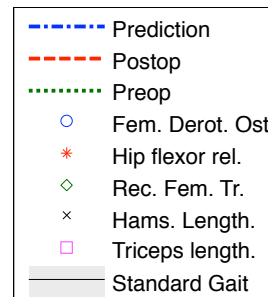
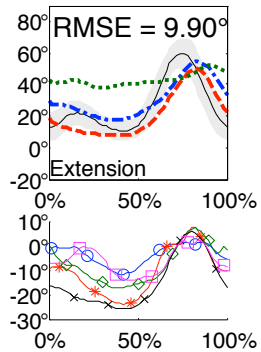
Pelvis



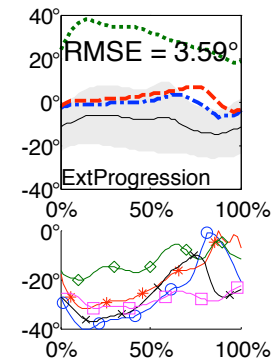
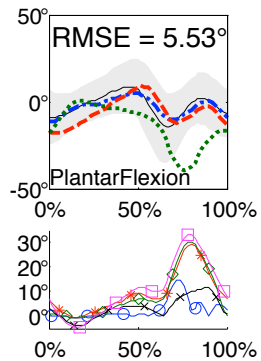
Hip



Knee



Ankle/Foot



Résultats: Comparaison de méthodes

Method	Test RMSE [MEAN (SD)] (°)								
	PT	PO	PR	HF	HA	HR	KF	AF	FP
Proposed	5 (4)	3 (2)	6 (4)	6 (4)	4 (2)	9 (7)	9 (6)	7 (5)	9 (7)
Mean-P (Postoperative mean)	7 (4)*	4 (2)*	7 (4)*	8 (4)*	4 (2)*	10 (6)*	11 (6)*	8 (4)*	11 (7)*
No Change-P (Preoperative)	6 (4)*	4 (2)*	8 (5)*	7 (5)*	5 (3)*	12 (8)*	14 (9)*	13 (11)*	15 (11)*

*Significant difference with respect to the proposed method ($p < 0,05$)

Dimensions optimales de la PCA : 8-13 (81%-89% de la variance totale)

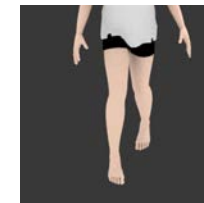
Discussion

- Le système prédit la cinématique postopératoire du patient, en fonction de son état préopératoire et de la chirurgie proposée avec des erreurs plus petites que la moyenne postopératoire
- Application limitée à des patients (et chirurgies) similaires à ceux de la base de données d'apprentissage
- De nombreuses combinaisons chirurgicales sont envisagées (et prédites) en dépit du «manque» de données
- Le système aide à mieux visualiser le résultat chirurgical le plus probable, permettant une meilleure compréhension (et discussion) du traitement et de ses résultats avec le clinicien et le patient

Avant la chirurgie



Prédiction



Après la chirurgie



Publications et conférences

- Galarraga C., O.A., Vigneron, V., Dorizzi, B., Khouri, N., Desailly, E., 2016. Predicting Postoperative Gait in Cerebral Palsy. *Gait & Posture*. InPress
- Galarraga C., O.A., Vigneron, V., Dorizzi, B., Khouri, N., Desailly, E., 2016. Predicting Postoperative Gait in Cerebral Palsy. *Gait & Posture* 49,S2. (Best paper session. ESMAC 2016).
- Galarraga C. O.A., Vigneron 15ème congrès de la SOFA
- Galarraga C., O.A., Vignero Children. *Movement & Spc*
- Galarraga C., O.A., Vignero (Best paper session. ESMA)
- Galarraga C., O.A., Vignero *Methods in Biomechanics*
- Galarraga C. O., Vigneron \ *Neural Networks*. In *Procer*
- Galarraga C. O.A., Vigneron *enfants atteints de paralysi*
- Galarraga C. O.A., Vigneron 13ème journées de la SOF
- P. Santos A., Ben Amar F., E palsy. *Gait & Posture*, Vol 49, Supp 2. ESMAC 2016.
- P. Santos A., Ben Amar F., Bidaud P., Padois V. and Desailly E. (2016). Exploring Walking Patterns of Cerebral Palsy Children by Numerical Simulation. *Journées Nationales de la Robotique Humanoïde*.
- P. Santos A., Ben Amar F., Bidaud P., and Desailly E. (2016). Simulation dynamique de marches multi-contacts pour un modèle numérique humain. 15ème Congrès de la SOFAMEA.
- P. Santos A., Ben Amar F., Bidaud P., and Desailly E. (2016). Influence of Knee flexion angle at initial contact and hip internal rotation on 'stiff-knee' gait: A dynamical 3D approach. *Mov Sport Sci/Sci Mot*.
- P. Santos A., Ben Amar F., Bidaud P., and Desailly E. (2015). Gait synthesis for an anthropomorphic human model with articulated feet. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, Vol 18, Supp 1.
- P. Santos A., Ben Amar F., Bidaud P., and Desailly E. (2015). Gait synthesis assessment of the effect of crouch gait and hip internal rotation on 'stiff-knee' gait. *Gait & Posture*, Vol 42, Supp 1.
- P. Santos A., Ben Amar F., Bidaud P., and Desailly E. (2015). Influence de la marche genoux fléchis et de la rotation interne de hanche sur la raideur du genou : approche dynamique 3D. 14ème Congrès de la SOFAMEA.



Full length article

Predicting postoperative gait in cerebral palsy

Omar A. Galarraga C.^{a,b}, Vincent Vigneron^b, Bernadette Dorizzi^c, Néjib Khouri^{a,d}, Eric Desailly^{a,*}

^a UNAM, Pôle Recherche & Innovation, Fondation Ellen Poidatz, 1 Rue Ellen Poidatz, Saint-Fargeau-Ponthierry, France

^b IBISC—EA 4526, Université d'Evry Val d'Essonne, 40 Rue du Pelvoux, Courcouronnes, France

^c SAMOVAR—UMR 5157, Télécom SudParis, Institut Mines-Télécom, 9 Rue Charles Fourier, Evry, France

^d Chirurgie Orthopédique Pédiatrique, Hôpital Universitaire Necker-Enfants Malades, 149 Rue de Sèvres, Paris, France



teints de paralysie cérébrale.
tial Contact of Cerebral Palsy
lsy. *Gait & Posture* 42, S2–S3.
al palsy children. *Computer*
f Cerebral Palsy Children using
2.
assin postopératoires chez des
ant et l'Adulte).
des enfants paralysés cérébraux.

patients affected by cerebral