

Cheville du robot NAO

Consignes générales (Concours CCP ou Centrale)

Lors de cette épreuve, les qualités de la prestation orale et de l'autonomie sont évaluées.

Pour illustrer la présentation, des dessins, schémas et graphes élaborés avec soin pourront être utilisés. Pour cela, il est conseillé de faire, au fur et à mesure de l'avancement, **des copies d'écran** des mesures obtenues pour les insérer dans un document numérique à sauvegarder régulièrement.

Les suites Libre Office et/ou Microsoft Office sont disponibles sur le PC de chaque candidat.

Compétences du programme de SII

La prestation orale est évaluée au travers des compétences ci-dessus, et en particulier :

- ⇒ **Communiquer**
- ⇒ **Analyser**
- ⇒ **Expérimenter**
- ⇒ **Modéliser**



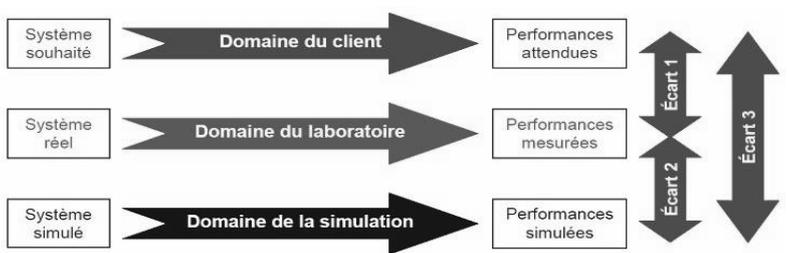
Durant cette épreuve le candidat sera amené à s'inscrire dans la démarche de l'ingénieur, d'analyse et de résolution de problèmes sur un système complexe industriel.

Celle-ci se représente symboliquement par le schéma suivant montrant les écarts :

Trois domaines d'étude :

- commanditaire ou client,
- laboratoire,
- simulation

et trois écarts entre ces trois domaines.



À chaque fois que cela lui sera demandé, le candidat devra indiquer le domaine sur lequel l'étude est menée et l'écart qui est quantifié. **L'argumentation sur la justification des écarts doit être contextualisée, on attend autre chose qu'un discours standard donc creux...**

On distingue 3 parties (concours CCP) ou 4 parties (Concours Centrale Supélec) dans le sujet :

- **La première partie** vise à découvrir le système et son fonctionnement global. Une approche fonctionnelle est abordée (diagramme CECI, diagrammes SYSML...) et la problématique de l'étude est posée.

A l'issue de cette première partie un exposé de 5min maximum est demandé.

Les spécificités du système doivent alors être intégrées, la différence entre système réel et système didactisé clairement exprimée. On peut vous demander de commenter l'écart entre les performances mesurées et celles exigées.

- **La seconde partie** (environ 2H sur CCP et 1H sur Centrale) vous amène à :
 - vérifier les performances attendues d'un système complexe en mettant en œuvre un protocole de mesure que vous choisirez,
 - construire et valider, à partir d'essais, une partie de la modélisation du système,
 - prévoir des performances d'un système complexe en vue d'imaginer et choisir des solutions d'évolution répondant à un besoin exprimé,
 - ajuster les réglages de correcteur,
 - traiter les données numériques (programmation Python : tracés de courbes, filtrage, régression linéaire, traitement de liste...).

Pour le concours CCP cette partie est guidée par le questionnaire, pour le concours Centrale vous devez la mener en autonomie

- **La troisième partie du concours Centrale (environ 1H)** est le prolongement de la partie 2 sur la modélisation et la vérification de performances en suivant un questionnaire guidé.
- **La dernière partie (3^{ème} à CCP ou 4^{ème} à Centrale)** est réservée à la synthèse globale de vos activités. Il faut alors :
 - conclure quant à la problématique abordée dans le TP,
 - préciser la ou les démarche(s) adoptées pour répondre au problème posé,
 - montrer votre capacité à utiliser les résultats obtenus (simulés ou mesurés) pour décider et choisir une évolution technique en rapport avec un cahier des charges.

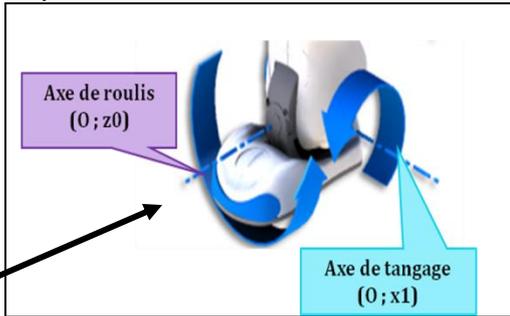
Rappel : L'évaluation porte sur la prestation orale et les capacités à travailler en autonomie.

TP Préparation aux oraux (durée 4h)

Cheville du robot NAO

MISE EN SITUATION

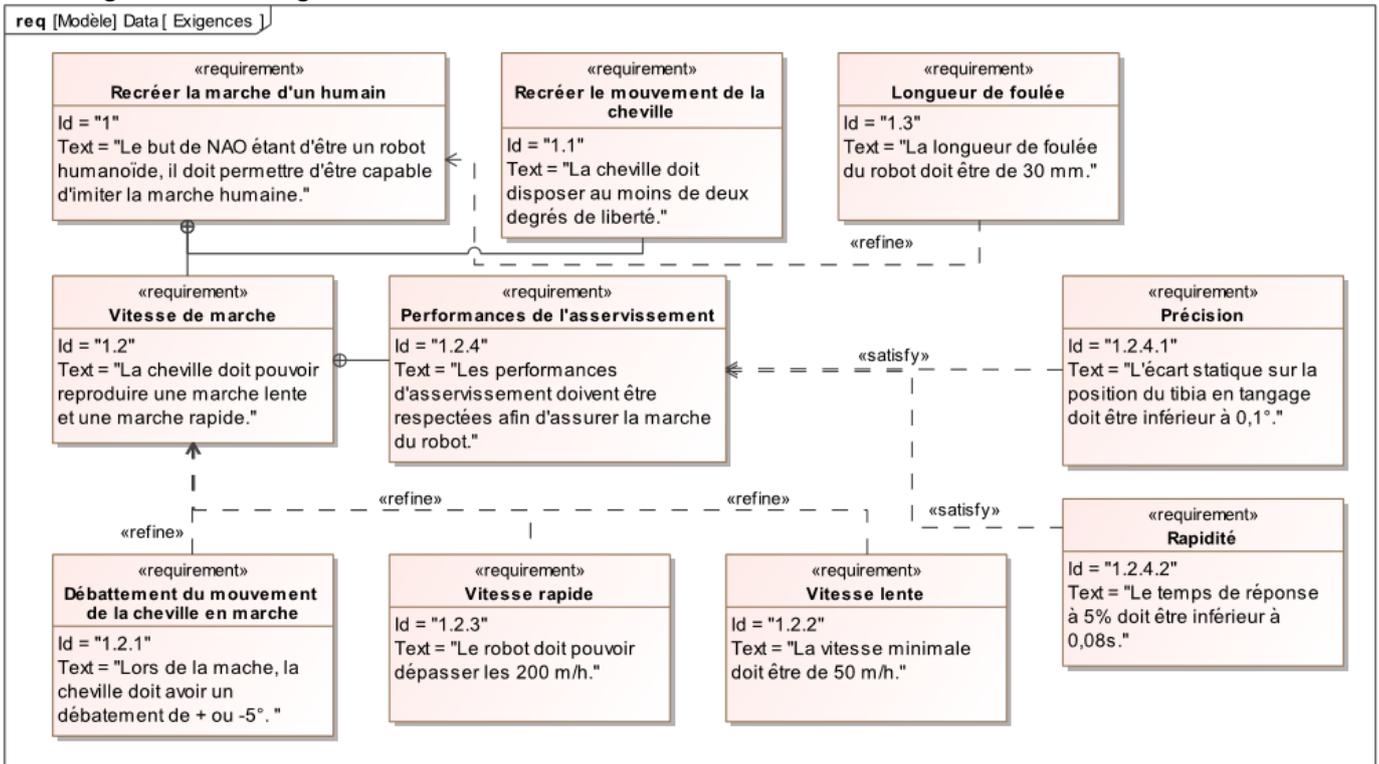
Le Robot humanoïde Nao, créé par la société Aldebaran, est avant tout un démonstrateur ; l'objectif est de réaliser un robot d'aide à la personne plus grand : Roméo. Le système didactisé mis à votre disposition est une chaîne fonctionnelle extraite du robot NAO, il s'agit de la cheville.



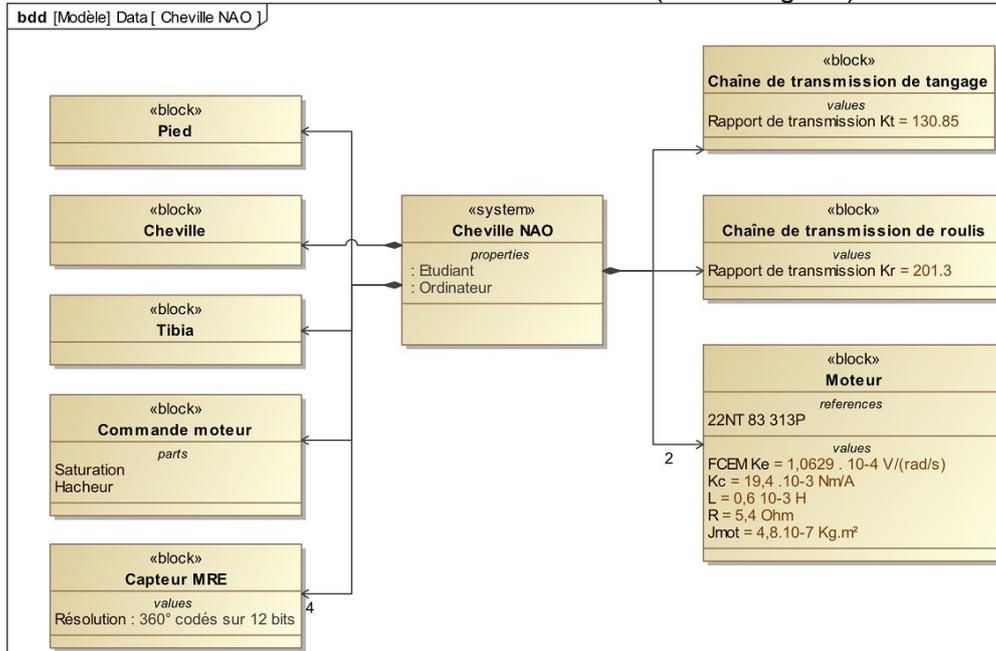
L'étude porte uniquement sur un sous-ensemble du robot, la cheville.

Les solutions retenues pour les 2 robots sont très proches. Les chevilles possèdent 2 axes de rotation (roulis et tangage), le contrôle de la position angulaire de ces axes est fondamental. Les contraintes mécaniques sur Roméo sont telles qu'il est nécessaire d'imbriquer 3 boucles de régulation (courant, vitesse et position).

Son diagramme d'exigences SYSML est le suivant :



Le diagramme structurel de cette version instrumentée ou bdd (block diagram) est le suivant :



TP Préparation aux oraux (durée 4h)

Cheville du robot NAO

PARTIE 1 : Découverte du système, problématique à résoudre (30 à 45min max)

A la fin de cette première partie, vous devez faire une synthèse orale de 5 min.

Une documentation technique est à votre disposition dans l'espace FLTISI / systèmes, mais si vous avez des questions, ne restez pas bloqué, n'hésitez pas à appeler l'examineur.

Activité 1 Découverte du système, mise en service du logiciel de pilotage

- **Prendre connaissance** du dossier « Cheville Nao_dossier technique.pdf ».
- **Mettre en service** le sous-système à l'aide du logiciel en veillant à respecter les consignes.
- **Commander** la cheville en pilotage interactif de type « joystick » sur ses 2 axes.
- **Donner** le nom des 2 angles contrôlés et **identifier** ces 2 mouvements d'articulation sur votre propre cheville.

Activité 2 Comparer le système didactique utilisé et le système réel

- **Reprendre** le diagramme d'exigences de la cheville et **justifier** les critères de précision et de rapidité définis par les exigences « 1.2.4.1 » et « 1.2.4.2 ».

Activité 3 Diagramme CECI

- **Préparer** une présentation de la chaîne d'énergie et de la chaîne d'information d'un des 2 axes.

Activité 4 Dégager la problématique principale que doit respecter ce système dans son contexte d'utilisation.

👉 Dès que votre synthèse orale est prête, le signaler à l'examineur, puis passer à la suite sans attendre.

PARTIE 2 : Solutions techniques et modélisation (1h maxi)

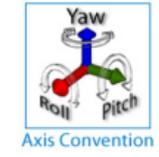
Activité 5 Fonction transmettre et réversibilité de la chaîne d'énergie

- **Etablir** le schéma cinématique, puis **déterminer** le degré d'hyperstatisme h de la cheville.
- **Justifier** les solutions techniques réalisant ces liaisons.
- **Associer** un matériau et un procédé d'obtention à la semelle (pièce Inventor repérée ALD_M010099_P_structure_pied_gauche_default).
- **Justifier** et **argumenter** votre réponse.
- **Evaluer** l'influence de la fonction transmettre sur le respect de la problématique.
- **Dans un contexte d'emploi du bras que vous décrirez, indiquer** la nature de la réversibilité de la chaîne d'énergie pour le système didactique que vous utilisez et pour le système réel alimenté sur batterie.
- **Justifier les écarts de comportement** entre le système réel et le système didactisé.

Activité 6 Chaîne d'acquisition de la position de la cheville sur l'axe de roulis

- **Indiquer** comment est connue la position angulaire de la cheville (type de capteur, principe, caractéristiques essentielles...).
- **Donner** la résolution fournie par ce capteur en incréments/degré puis en unités SI.
- **Préciser** quelles caractéristiques relatives au capteur angulaire sont à l'origine des écarts entre le système souhaité et le système réel.
- **Situer** la fonction de transfert du capteur dans un schéma bloc de l'asservissement de position.
- **Indiquer** l'origine des incertitudes de votre modèle, **évaluer** les écarts entre modèle et réel et les conséquences sur le respect du cahier des charges.

Cheville du robot NAO**PARTIE 3 : Validation de critères du cahier des charges et des modèles (2h maxi)****Performances demandées (colonne de droite, données en degrés)**

Left leg		LHipYawPitch	Left hip joint twist (Z45°)	-44 / 68
		LHipPitch	Left hip joint front and back (Y)	-104.5 / 28.5
		LHipRoll	Left hip joint right & left (X)	-25 to 45
		LKneePitch	Left knee joint (Y)	-5 / 125
		LAnklePitch	Left ankle joint front & back (Y)	-70.5 / 54
		LAnkleRoll	Left ankle joint right & left (X)	-45 to 25

Partie 3.1 Modélisation dans un modeleur 3D et pilotage du moteur (1h maxi)**Activité 7 Equilibre statique (centre de gravité et surface de sustentation)**

- **Relever** les caractéristiques relatives aux articulations de roulis puis de tangage.
- **Vérifier** manuellement sur la cheville ces caractéristiques pour chacun des mouvements.
- Dans le cas d'un équilibre sur un pied, **définir** la condition d'équilibre en illustrant la position du centre de gravité G et de la surface de sustentation (faire un schéma avec 2 vues perpendiculaires du robot et le poids en G).
- **Proposer** un protocole d'essais permettant de trouver la limite d'équilibre :
 - pour 2 angles (roulis et tangage) de +15° en modifiant le centre de gravité,
 - Pour une masse de 200g située sur la règle à la position ____ cm en modifiant les angles de roulis et tangage.
- **Fournir** à chaque fois des valeurs chiffrées.

Activité 8 Indépendance des mouvements entre les 2 axes

- **Justifier** dans un contexte réel cette nécessité d'indépendance de mouvement.
- **Proposer** un protocole d'essais et mesures pour vérifier qu'un mouvement demandé sur un axe est sans effet sur l'autre.
- **Tester** les 2 situations possibles pour des consignes sinusoïdales de +/-15° et de période 4 secondes, autour d'un point de repos que vous définirez.
- **Produire** des résultats graphiques de mesure et **conclure**.

Activité 9 Mouvements combinés des 2 axes en mode asservi (correction proportionnelle)

- **Définir** les 2 consignes à fournir sur les axes de roulis et tangage pour obtenir une rotation circulaire de période 2 secondes et d'amplitude +/-15° dans le plan (x, y) en fonction du temps.
- **Faire fonctionner** le système en boucle fermée avec une correction proportionnelle pure Prop = 1000 ; Integ = 0 et Deriv = 0 . **Visualiser** simultanément consignes et angles mesurés :
 - en fonction du temps
 - en mode XY (X en abscisse et Y en ordonnée)
- **Analyser** le tracé obtenu et **indiquer** les différents défauts observés ; puis **rechercher** leur origine (mécaniques, électriques...).

Activité 10 Conclusion : information d'équilibre et consigne

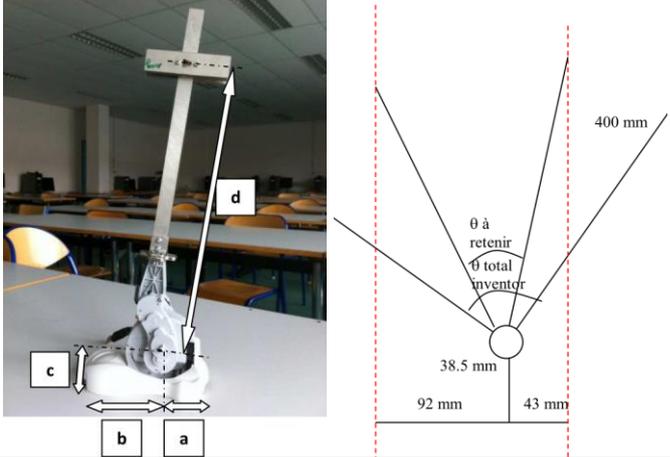
Conclure cette troisième partie en indiquant :

- comment obtenir une information permettant de détecter un risque de chute du robot (nature de l'information et capteur à utiliser),
- Comment ajuster la réponse indicielle des 2 axes afin d'éviter la chute du robot.

Cheville du robot NAO

Partie 3.2 Modélisation théorique de la loi d'équilibre, exploitation pour la commande numérique, script PYTHON de visualisation (1h maxi)

Cette partie est le prolongement de l'activité 7 vue en partie 3.1

<p>MODELISATION THEORIQUE DE L'EQUILIBRE DE LA CHEVILLE</p> <p>Hypothèses :</p> <ul style="list-style-type: none"> • on admet la masse concentrée au point de fixation de la masselotte de 200g. Ce point est noté P. • Le tibia étant vertical et la surface du sol horizontal, l'angle θ du tibia est considéré nul. • Les longueurs utiles sont données en mm 	 <p>Figure 1</p> <p>Figure 2</p>
---	--

Activité 11 Modélisation théorique de l'équilibre

- Fournir la valeur du segment d en mm.
- Etablir à partir de la figure 2, la relation de la projection du segment de longueur d sur le sol horizontal en fonction de l'angle θ .
- Poser la ou les condition(s) d'équilibre de cette isolement {cheville + tibia} sous forme de proposition(s) logique(s).

Activité 12 Algorithme de principe du contrôle de l'équilibre pour l'axe de tangage

- Proposer une structure algorithmique (pseudo-code) permettant de maintenir la condition d'équilibre avec pour variable d'entrée l'angle θ du tibia et comme variable de sortie la tension moyenne $\langle U_m \rangle$ appliquée au moteur de tangage.

Activité 13 Tracé théorique de la loi E/S de l'équilibre du robot en langage Python

Rappels : python utilise le point décimal et non la virgule, le module Numpy utilise les angles en radians...

On vous fournit un script en langage python « **NAO_Equilibre_Eleve.py** » qu'il faut compléter et/ou modifier pour pouvoir tracer l'évolution de la position du centre de masse au sol et vérifier l'équilibre du robot.

Cet équilibre sera déterminé pour un basculement vers l'avant et un basculement vers l'arrière. Vous tracerez pour cela la loi E/S d'équilibre dans les 2 cas.

- Créer un dossier « **NAO_Equilibre_votrenom** » sur votre bureau.
- Ouvrir le fichier « **NAO_Equilibre_Eleve.py** » avec une console « spyder ou pyzo », compléter ou modifier les zones signalées PAR LES COMMENTAIRES dans le programme puis l'exécuter. Débugger les erreurs en utilisant la console. Insérer des instructions d'affichages de valeurs de calcul par exemple. Lorsque votre programme fonctionne, l'ensemble des tracés E/S doit apparaître.
- Comparer les résultats simulés à partir du modèle géométrique théorique et commenter en justifiant les écarts éventuels.
- Préparer une synthèse orale de cette activité. Pour pouvez utilement proposer un lien entre l'activité 12 et l'activité 13.

Partie 4 : Synthèse : exposer clairement le travail effectué (15 min)

- Proposer une synthèse de votre travail. Vous devrez faire apparaître la démarche scientifique mise en œuvre pour répondre à la problématique avec les principaux éléments clés (courbes, schémas, résultats numériques,...) obtenus durant votre étude.
- Les outils de communication sont laissés à votre initiative.

TP Préparation aux oraux (durée 4h)

Cheville du robot NAO

Pour un système multicorps, le centre de gravité G de l'ensemble est donné par le barycentre des centres de gravité de chaque solide G_i .

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n m_i G_i}{\sum_{i=1}^n m_i}$$

La **surface de sustentation**, ou **polygone de sustentation**, est la surface sur laquelle la projection orthogonale du centre de gravité d'un solide sur le sol, ou sur un support, doit se trouver pour garantir l'équilibre.

La condition de non-basculement s'exprime comme suit : « la droite d'action du poids doit couper la surface de sustentation, c'est-à-dire que la verticale passant par le centre de gravité doit couper la surface de sustentation ».

Exemple : pour une chaise sur un plan incliné, la projection du centre de gravité ne doit pas sortir de la surface de contact symbolisée par les quatre pieds. En robotique, cela correspond à la surface recouverte par la partie du robot. Elle le soutient si la projection du centre de gravité y est contenue.

Pour un **robot marcheur**, si ce dernier se tient sur un pied, la surface de sustentation aura la forme de ce pied. S'il se tient sur ses deux pieds, la surface sera celle des deux pieds, plus la surface interpodale.

Equilibre statique

Le « zéro moment point » ZMP est le point de jonction entre l'axe inertiel et le sol.

Dans un cas simple d'un robot bipède marchant sur sol horizontal, cet axe inertiel est défini comme étant l'axe porteur de la somme de l'accélération du robot et de son poids.

Tant que le ZMP reste contenu dans la figure délimitée par les points d'appuis, le robot reste stable.

Maintenir le ZMP dans cette figure est le moyen le plus facile d'obtenir une marche stable.

Equilibre en mouvement

Extrait de la thèse de J-Luc Paillat : « Conception et contrôle de robots à géométrie variable : applications au franchissement d'obstacles autonome »

3.3.2.1 Définition du ZMP

Prenons un solide quelconque en contact avec le sol. Pour simplifier, posons \vec{F}_A et M_A respectivement une force et un moment appliqués au point A représentant l'ensemble des actions qui agissent sur le solide (figure 3.17). Dans le cas de l'étude d'un robot bipède, le solide serait un pied, et \vec{F}_A , l'influence du corps sur le pied. Dans le cas de B2P2, le solide représenterait le châssis, et \vec{F}_A l'influence de la partie mobile sur celui-ci. D'après [Vukobratovic 2004], le moment exercé par la force \vec{F}_A peut être compensé en modifiant le point d'action de la force de réaction du sol \vec{R} . Ainsi, l'équilibre est assuré si \vec{R} peut être évaluée en un point du sol P pour lequel M_x et M_y (composantes horizontales du moment généré par R) sont nulles. Bien entendu, si ce point P est en dehors du polygone de sustentation, il n'a plus d'existence réelle car le sol n'exerce aucune réaction à cet endroit, on parlera alors de FZMP (Frictionless Zero Moment Point) [Vukobratovic 2004] ou de FRI (Foot Rotation Indicator)[Goswami 1999].

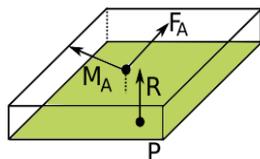


FIG. 3.17 – Forces en action sur le solide

3.3.2.2 Calcul du ZMP

Les coordonnées du ZMP sont décrites à partir des équations de la dynamique de Newton. Rappelons tout d'abord que le moment généré par une force \vec{R} en un point z noté M_z et en un point 0 noté M_0 , sont soumis à la relation suivante :

$$M_0 = M_z + \vec{OZ} \wedge R \tag{3.26}$$

L'application des lois de Newton au robot soumis à la force de pesanteur ainsi qu'à la force de réaction du sol s'écrit :

$$\begin{cases} m\ddot{G} = R - P \\ \delta_0 = M_O + \vec{OG} \wedge \vec{P} \end{cases} \tag{3.27}$$

avec :

- m la masse totale du robot,
- G , le centre de gravité,
- R les forces de réaction du sol,
- P la force de pesanteur (égale à $mg\vec{z}$),
- δ_0 le moment dynamique du robot évalué au point O ,
- M_0 le moment généré par R au point O .

A partir de 3.26, ces relations peuvent être réécrites :

$$\begin{cases} R = m\ddot{z} + m\ddot{G} \\ \delta_0 = M_z + \vec{OZ} \wedge \vec{R} + \vec{OG} \wedge \vec{P} \end{cases} \tag{3.28}$$

En considérant Z comme étant le ZMP, M_{z_x} et M_{z_y} sont nuls. On obtient alors la relation suivante :

$$\begin{cases} \delta_{0x} = Z_y R_z + G_y P_z - G_z P_y \\ \delta_{0y} = Z_x R_z + G_x P_z - G_z P_x \end{cases} \tag{3.29}$$

Ainsi, les coordonnées du ZMP (notées Z_y et Z_x) sont calculées directement en fonction du vecteur de coordonnées articulaires \vec{q} par la relation :

$$\begin{cases} Z_y = \frac{\delta_{0x}(\vec{q}) - G_y(q)P_z + G_z(q)P_y}{R_z(\vec{q})} \\ Z_x = \frac{-\delta_{0y}(\vec{q}) + G_x(q)P_z - G_z(q)P_x}{R_z(\vec{q})} \end{cases} \tag{3.30}$$

Notons que si la vitesse et l'accélération du robot sont nulles, alors le ZMP est naturellement confondu avec le projeté du centre de gravité. L'expression détaillée