

CHAPITRE I

LA GESTUELLE

Les robots sont destinés à reproduire de manière autonome et automatique les gestes et les fonctions motrices de l'homme ou de l'animal. Les zones d'évolution vont de l'infiniment petit à l'infiniment grand. Il est utile d'établir une classification des mouvements et de leurs caractéristiques.

1. MOUVEMENTS ET DONNEES BIOMETRIQUES

1.1. Divers types de mouvements

a. Les mouvements d'accès

Souvent de grandes amplitudes, ils dépassent les limites de la manipulation normale et exigent de s'approcher de la tâche.

b. Les mouvements dans l'espace de travail

Ils caractérisent les mouvements de la pince ou de l'outil dans les zones de travail. Leurs formes et dimensions sont définies par l'architecture du robot, la longueur des segments, les excursions linéaires et angulaires. Ces mouvements, de grande et moyenne amplitudes, permettent les approches et le pré positionnement. La précision est moyenne.

c. Les mouvements locaux d'approche précise de l'élément terminal

Ces mouvements s'effectuent dans des zones libres ou exiguës. Adjoindre une glissière entre le dernier axe du poignet et la pince facilite l'accès et la mise en position dans un espace réduit. Les poignets sont fragiles, il faut loger dans un espace restreint les articulations, les motorisations, les transmissions, les capteurs, les connectiques mécaniques, énergétiques et informationnelles. Implanter les actionneurs à l'arrière du poignet affine sa conception mais peut créer une élasticité dans la transmission.

1.2. Données biométriques

Elles permettent une comparaison homme - robot, sont utiles à la conception et la commande des télémanipulateurs par une personne. Elles servent aussi à l'aménagement des postes de travail et à la conception des structures.

a. Amplitudes des mouvements du membre supérieur - Figure 1.1

a.1 Bras et articulation de l'épaule :

1 - Elévation latérale	40°	6 - Rotation externe en abduction	90°
2 - Abduction latérale	90°	7 - Rotation interne en abduction	90°
3 - Elévation vers l'avant	90°	8 - Hyper extension arrière bras tendu	40°
4 - Flexion vers l'avant	90°	9 - Abduction avant-bras tendu	140°
5 - Hyper extension arrière	45°		

a.2 Main et articulation de la main

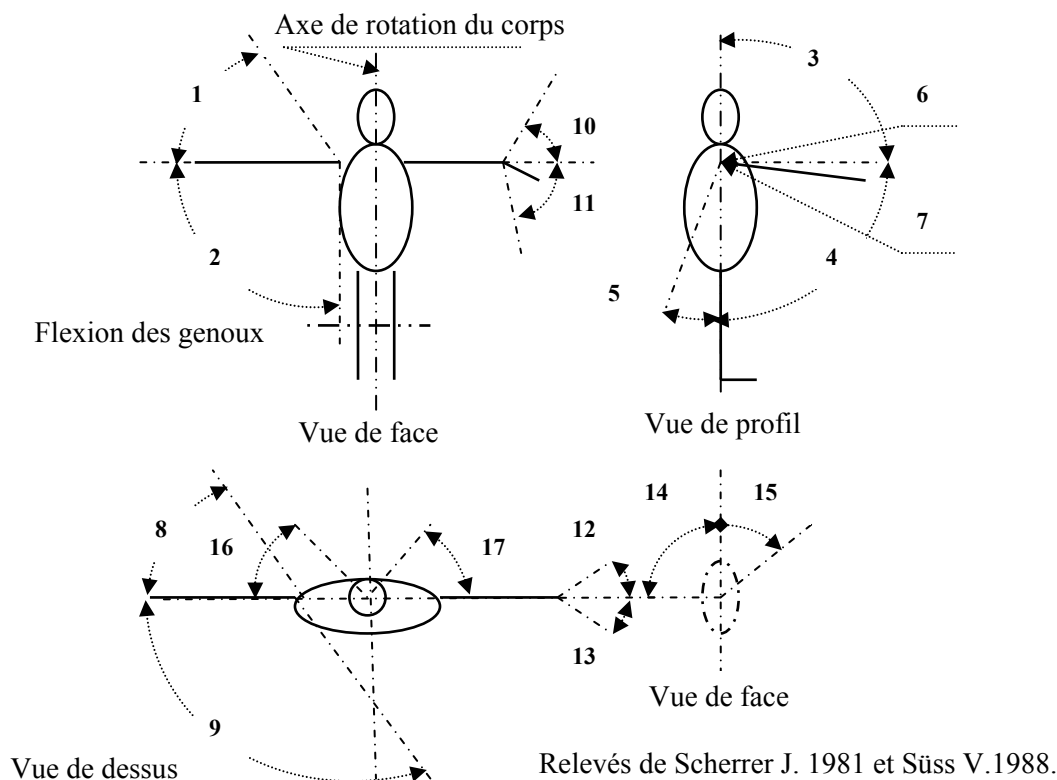
10 - Flexion dorsale	65°	12 - Abduction arrière	15°
11 - Flexion palmaire	75°	13 - Abduction avant	30°

a.3 Bras et avant-bras, les rotations

14 - Supination 90° 15 - Pronation 80°

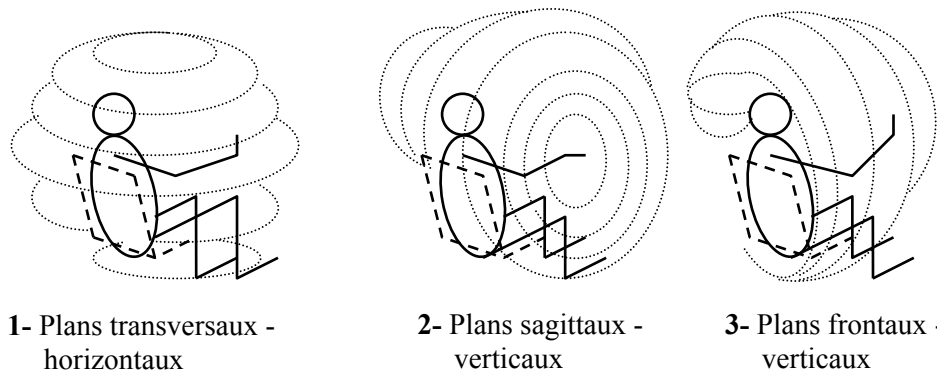
a.4 Omoplate, colonne vertébrale

16 - Rotation à droite 40° 17 - Rotation à gauche 40°

**Figure 1.1 :** Excursions angulaires du membre supérieur de l'homme**b. Zones d'atteintes par une personne assise - Poste de pilotage**

Les zones d'activités préférentielles, proches du corps, nécessitent une dépense minimale d'énergie et génèrent peu de fatigue, tandis que les zones d'atteintes extrêmes entraînent une fatigue causée par l'extension du bras et une dépense d'énergie accrue.

La redondance du membre supérieur de l'homme, doté de ses capteurs biologiques, permet une grande diversité de mouvements : rapides, lents, précis...

**Figure 1.2 :** Zones d'atteintes

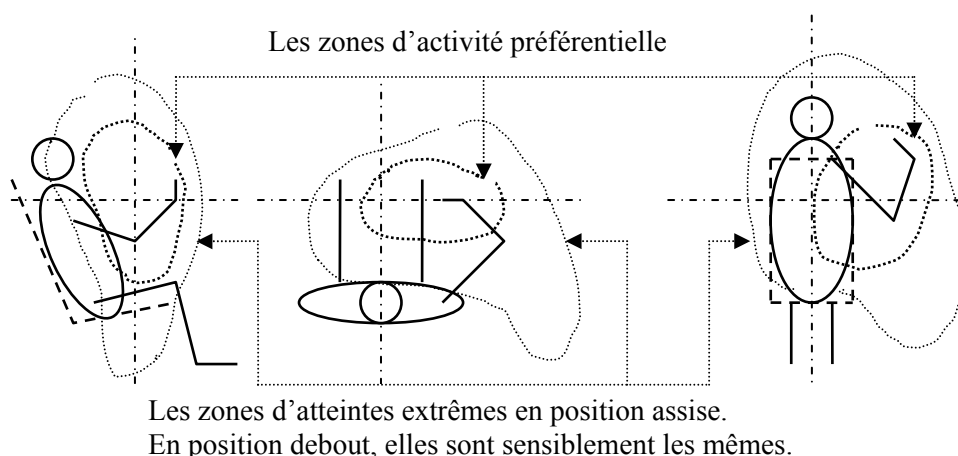


Figure 1.3 : Zones d'atteintes préférentielles et extrêmes en position assise

c. Valeurs biométriques

c.1 Poids du membre supérieur d'un homme de 75 kg \cong 4,90 kg

Le bras 2,54 kg - L'avant-bras 1,72 kg - La main 0,64 kg

c.2 Mesures anthropométriques, en centimètres

	homme	femme
- Largeur d'épaules	44,5	40
- Longueur de l'avant-bras, main tendue	47,5	42,5
- Distance entre le dos et l'extrémité des doigts, bras tendu vers l'avant	77	73
- Distance entre l'axe du corps et le bout des doigts, bras horizontal, tendu latéralement	85	77

c.3 Force musculaire

La notion de force musculaire est intuitive. On distingue deux types de forces.

- La force maximale ou valeur de crête que le sujet peut maintenir durant 5 à 10 s.
- La valeur critique, durée maximale pendant laquelle elle peut être exercée sans fatigue.

La force musculaire varie selon de nombreux facteurs, on retrouve des critères similaires pour les bras de robots. La force maximale est fonction de la durée de la surintensité que peuvent supporter les moteurs. Les actionneurs sont comparés aux muscles et les transmetteurs aux nerfs. Lorsque le système mécanique est irréversible, cette notion de force critique n'a plus de sens. La position relative des segments du bras joue un rôle important sur l'effort développé. Un calcul mécanique permet d'en mesurer les capacités. La position du corps, assis ou debout, a peu d'influence sur la force.

1 - Effort vertical	: vers le haut	288 N	vers le bas	343 N
2 - Action horizontale	: vers le corps	183 N	de poussée	222 N
3 - Couple	: vers l'intérieur	23,2 Nm	vers l'extérieur	18,7 Nm

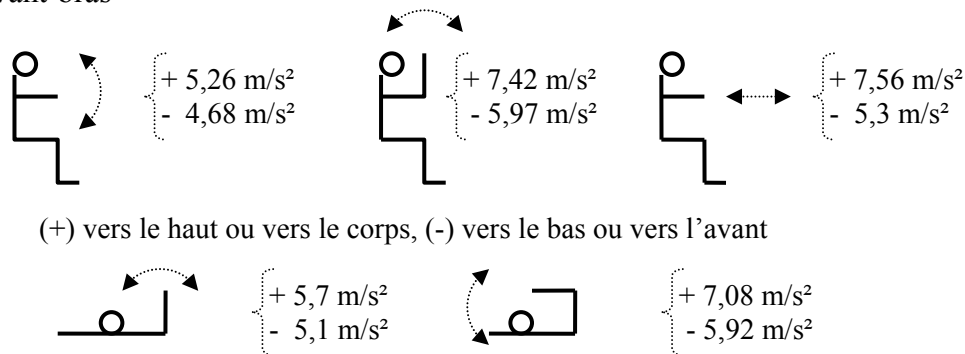
c.4 Vitesse maximale de la main, elle est proportionnelle aux masses en mouvement.

- Les valeurs moyennes retenues pour le bras humain varient entre 0,7 et 1 m/s.
- Les vitesses angulaires sont de 3,7 rad/s pour la rotation et de 3,4 rad/s pour la flexion.

c.5 Accélérations maximales

Elles sont données au niveau de la main ou du préhenseur dans différentes positions. Elles varient sensiblement selon la posture et le type de mouvement. La vitesse et l'accélération sont indispensables pour commander un bras maître - esclave.

c.5.1 L'avant-bras



c.5.2 Le bras

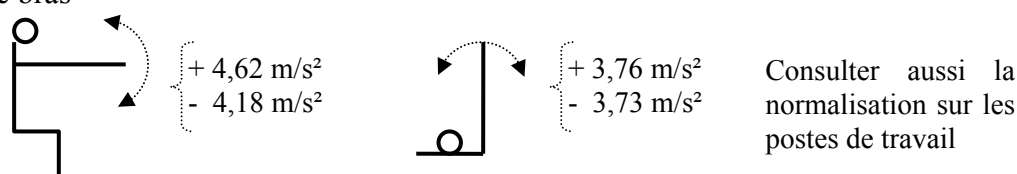


Figure 1.4 : Accélérations de l'avant-bras et du bras

d. Mesures de l'activité gestuelle et posturale de l'homme

Les techniques de mesures des mouvements humains et des robots sont classées en deux groupes. Le premier comprend l'étude des amplitudes, des vitesses, des accélérations à l'aide d'émetteurs, de réflecteurs de lumière, d'ultrasons, de photographies, de caméras avec prises de vues tridimensionnelles, de cellules lumineuses... Le second analyse les mouvements fins, les efforts, les déformations du bras à l'aide de jauges, de photographies, de palpeurs, de goniomètres, de potentiomètres, de codeurs...

e. Classification des mouvements

Dans toutes les branches d'activités on retrouve les mêmes classifications.

- Les mouvements lents et en force, souvent de faible amplitude : soulever, pousser, tirer.
- Les mouvements rapides, sans précision particulière : déplacer, frapper...
- Les mouvements rapides et précis : la danse, le sport, le suivi d'une trajectoire...
- Les mouvements très précis : la chirurgie, la sculpture, l'assemblage...

f. Espaces maximal et minimal de travail Voir les figures au paragraphe suivant.

f.1 Enveloppe maximale qui sera agrandie de la longueur de l'outil.

On ne peut suivre qu'une trajectoire sur l'enveloppe maximale, la saisie ne peut se faire que dans le prolongement du bras, de l'avant-bras et du préhenseur. Pour une autre orientation de saisie, un nouveau volume de manipulation est défini.

f.2 Enveloppe minimale de saisie.

Elle est définie par l'impossibilité de saisir ou de manipuler un objet lorsque le bras est replié. Elle est conditionnée par les limitations linéaires et angulaires des articulations. Il faut calculer et visualiser ces zones d'évolutions.

g. Précision du mouvement

- Elle est conditionnée par la position du corps et du bras.
- Elle varie de 0,2 à 0,8 mm près du thorax et elle est de 1,8 mm le bras tendu.

- La vitesse optimale du mouvement d'atteinte d'une cible avec une bonne précision est de l'ordre de 0,2 à 0,3 m/s. La correction est effectuée par adaptabilité du poignet et des doigts. La finesse du serrage dépend aussi de la position du bras.

h. Dépenses énergétiques

- Les activités manuelles de bureaux ou de loisirs, telles que jouer d'un instrument de musique, écrire requièrent une dépense de 130 à 200 W.
 - Les activités artisanales demandent 250 à 400 W.
 - Les activités sportives, selon l'intensité de l'effort, dépensent 400 à 1000 W.
- Il est intéressant de faire le bilan énergétique homme - robot pour les mêmes activités.

i. Zones de manipulations

- Les efforts exercés sont faibles à la périphérie du volume atteignable.
- La puissance développée est maximale pour un rayon d'activité inférieur à la moitié du rayon atteignable.
- Le volume de manipulation précise, proche du corps de la personne est aussi le volume pour lequel la dépense d'énergie est minimale.

j. Gestes

Au début du vingtième siècle, Taylor et Gilbreth ont déjà décomposé les mouvements en gestes élémentaires pour les mesurer, les chronométrer, les filmer, les réassocier afin d'optimiser les mouvements. Ils ont cherché à rendre les gestes fluides, harmonieux, sans point anguleux ou de rebroussement, limitant les accélérations et la fatigue. L'analyse est similaire pour la gestuelle des robots. Se reporter à l'analyse des postes de travail.

2. GESTES ELEMENTAIRES - POSTURES - ACTIVITES - L'ATTENTION

2.1. Application des gestes élémentaires à la robotique

Le 1^{er} groupe : - *Chercher - Trouver - Choisir*

Pour le robot, ces opérations s'effectuent respectivement par la vision et le sens tactile, le calcul et la commande des mouvements du bras ou du robot mobile, la décision et la commande de l'approche du préhenseur ou du chariot.

Le 2^{ème} groupe : - *Saisir - Transporter avec ou sans charge*
 - *Suivre une trajectoire - Pré positionner*
 - *Positionner le préhenseur ou le chariot*
 - *Contrôler - Assembler - Réunir - Lâcher*

Ces opérations impliquent d'importants calculs qui dépendent de nombreuses contraintes : éviter des obstacles, garder une orientation, maîtriser la vitesse au cours de la trajectoire ainsi que le problème de l'axe contraignant, généralement le plus lent... En découpant la trajectoire, les problèmes liés aux lois des mouvements, à la résolution des contraintes, aux asservissements et à la commande sont simplifiés.

Le 3^{ème} groupe : - *Tenir - Repos - Attente évitable ou non - Réfléchir*

Ces étapes, qui ne sont pas considérées comme des micromouvements ou des éléments gestuels, permettent de justifier l'absence d'activité cinématique.

Les mouvements sont mis en équations : par géométrie analytique, petits vecteurs, géométrie différentielle, maillage, courbes de Bézier, B-splines...

- **Tenir** requiert une alimentation continue de l'actionneur ou l'utilisation d'un frein, sauf si la transmission est irréversible.
- **Repos** ou **Retard inévitable** implique la notion de contrainte ou d'axe contraignant.
- **Prévision** et **Synchronisation**, que l'on trouve également dans les graphes d'analyse.

2.2. Les activités

Les multiples opérations qui aboutissent à la réalisation d'une tâche correspondent à quatre catégories d'activités. Elles interfèrent étroitement.

- L'activité sensorielle

C'est une prise d'informations des phénomènes qui interviennent dans l'environnement, dans la disposition des objets et de la situation du corps de la personne.

- L'activité centrale

Elle décode les informations reçues, les confronte avec des informations antérieures, puis arrête une décision.

- L'activité motrice

Elle débute par l'activation des centres nerveux et le décodage des ordres moteurs. Ceux-ci sont alors transmis aux muscles ou actionneurs qui libèrent l'énergie. Les articulations sont mobilisées automatiquement de façon coordonnée.

- L'activité du contrôle de la tâche

C'est un retour, un bouclage sur l'activité sensorielle grâce aux capteurs qui informent l'activité centrale, celle-ci juge de la stratégie à adopter et commande l'activation des centres nerveux pour modifier ou arrêter le geste.

2.3. L'attention

L'exécution d'une tâche nécessite une attention plus ou moins soutenue. La fatigue générée est quelquefois supérieure à celle causée par le mouvement ou la manipulation.

- Facteurs qui influent sur l'attention

* Exigences relatives aux connaissances, à l'apprentissage, à l'adaptation, à l'expérience, à la complexité des manœuvres et aux informations sensorielles.

* Exigences dues à l'intensité des efforts physiques, à la concentration qui peut être mentale, visuelle ou auditive, à la durée de manipulation et à la fatigue nerveuse.

* Exigences liées à l'opération qui peut être minutieuse, dangereuse, sans contrainte...

- L'attention distribuée ou diffusée

C'est la capacité à fixer l'esprit simultanément sur un grand nombre d'objets et à détecter la moindre anomalie. Les degrés varient selon le nombre d'objets à surveiller, l'intensité de la vigilance, la sagacité et la fugacité des évènements.

- L'attention concentrée

C'est l'aptitude à faire converger son attention vers un objet, une tâche déterminée, à dissocier le détail d'un ensemble et à en apprécier les caractéristiques. Les degrés varient selon la minutie de la perception et la précision du geste. La tension mentale dépend de la nature de l'attention, de son intensité, de sa fréquence et de sa durée.

Commentaire

Une étude des mouvements basée sur les apports de l'ergonomie permet d'éliminer les mouvements parasites et saccadés néfastes aux actionneurs et transmetteurs. Elle rend la

gestuelle harmonieuse, moins consommatrice d'énergie, limite les temps morts, quantifie les gestes et les trajets pour une connaissance précise de la durée des cycles.

L'universalité est coûteuse et inutile pour des travaux spécifiques.

3. POSTURES - MOUVEMENTS - TRANSPOSITION AU ROBOT

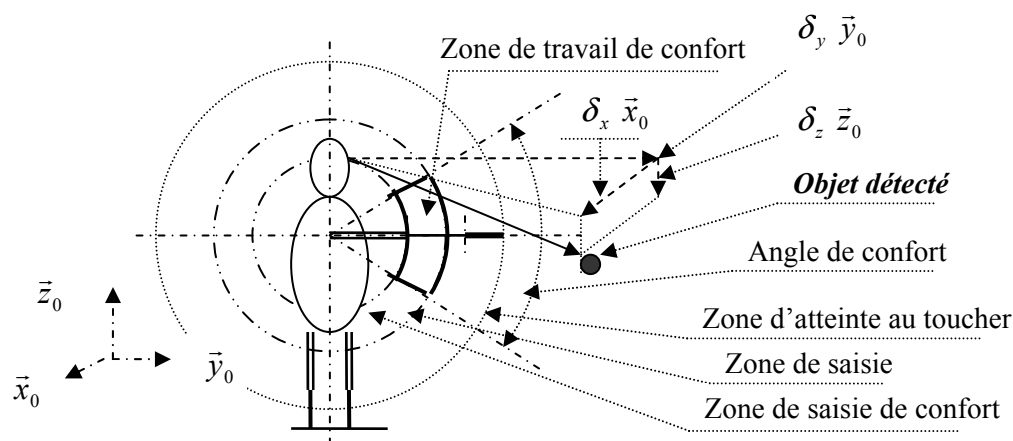


Figure 1.5 : Les zones accessibles et de confort

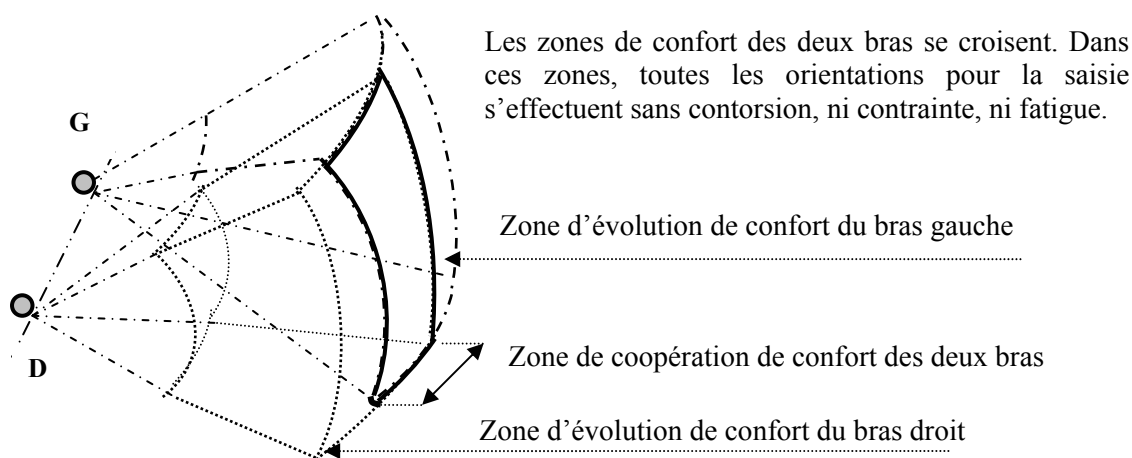


Figure 1.6 : Zones : de confort, de coopération et d'atteinte idéale des deux bras

3.1. Localisation et estimation des distances

Comme le montre la figure 1.5, la personne localise l'objet par la vision, le bruit ou un signal sonore pour les mal voyants. Le robot fait de même grâce à ses capteurs. Le signal peut être altéré par le milieu ambiant : brouillard, poussières en suspension, signaux bruités... Par apprentissage et habitude, la personne a en mémoire : formes, consistance, poids estimé, saisie à adapter, zones optimales d'atteinte. A partir de ces données, elle analyse la scène, évalue les caractéristiques et les gestes à réaliser, se déplacer, rechercher la posture la mieux adaptée pour un minimum de mouvement, de force et de fatigue, prendre, au besoin, un outil pour exécuter l'opération.

En robotique, la position de l'objet est modélisée mathématiquement, vérifiée par capteurs, comparée avec les éléments en mémoire, puis le calculateur élabore la stratégie.

3.2. Pré positionnement - Positionnement du bras d'un manipulateur

a. Les évolutions du poignet

Selon la conception du terminal et du nombre d'axes, il faut définir les possibilités d'approches et d'évolutions. Un terminal est utilisé pour une famille d'opérations, si celles-ci sont très variées, on change le terminal ou l'outil.

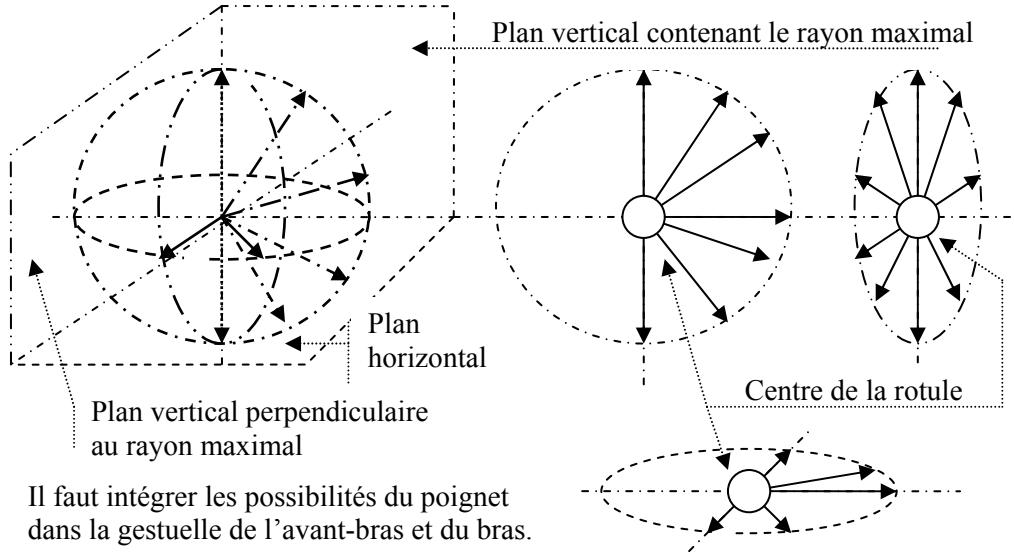
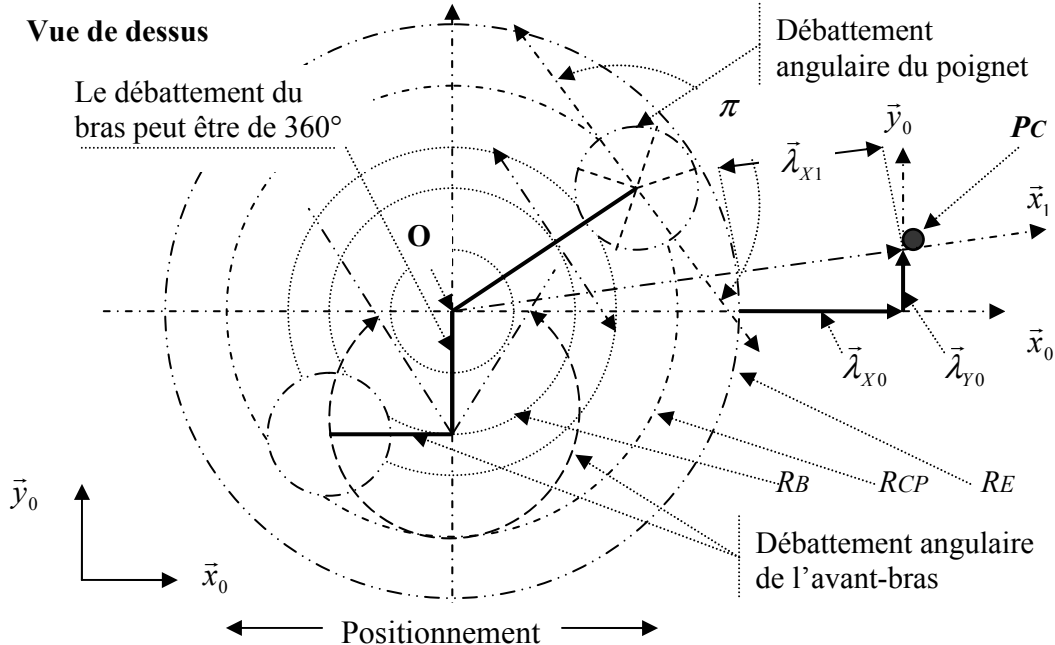


Figure 1.7 : Evolutions d'un poignet de structure rotule

b. Les évolutions horizontales et verticales de l'avant-bras et du bras

Vue de dessus



Ici, $\vec{\lambda}_{x1}$ n'est pas la somme vectorielle de $\vec{\lambda}_{x0}$ et $\vec{\lambda}_{y0}$. Il faut ensuite tenir compte de $\vec{\lambda}_{z0}$.

Figure 1.8 : Positionnement vis-à-vis d'une tâche dans le plan $\vec{x}_0 O \vec{y}_0$