

# SCIENCES INDUSTRIELLES POUR L'INGÉNIEUR

## DEUXIÈME ANNÉE : PSI

### I - PREAMBULE

La compréhension, l'étude, le développement et l'exploitation de systèmes techniques pluritechnologiques complexes nécessitent le développement d'une démarche ingénieur qui est une approche permettant la confédération du travail d'équipes pluridisciplinaires selon une logique de gestion de projet, utilisant un ensemble d'outils permettant de délimiter de manière claire les frontières de ses composantes et les étapes essentielles à sa mise en œuvre. Pour assurer l'efficacité de cette approche il faut construire une vision globale cohérente du système qu'on cherche à représenter. L'idée est de fédérer plusieurs langages d'assistance au développement de projet au sein d'un outil unique à utilisation polyvalente mais construit avec une forte cohérence sémantique permettant l'émergence d'une vision pertinente du système. C'est dans cet objectif que l'outil SysML (System Modeling Language) a été introduit dans l'actuel programme.

### II - OBJECTIFS DE FORMATION

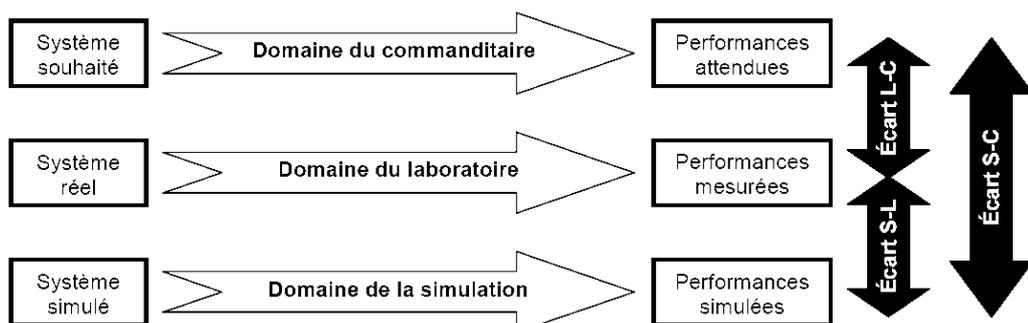
#### FINALITES

Les sciences industrielles pour l'ingénieur en classes préparatoires marocaines renforcent l'interdisciplinarité à travers l'analyse de réalisations industrielles existantes.

Il s'agit de modéliser des systèmes manufacturés relevant de tous les secteurs technologiques, de déterminer leurs grandeurs caractéristiques et de communiquer et interpréter les résultats obtenus en vue de faire évoluer le système réel.

L'enseignement des sciences industrielles pour l'ingénieur a pour objectif d'aborder la démarche de l'ingénieur qui permet, en particulier :

- de conduire l'analyse fonctionnelle, structurelle et comportementale d'un système pluritechnologique ;
- de vérifier les performances attendues d'un système, par l'évaluation de l'écart entre un cahier des charges et des réponses expérimentales ;
- de proposer et de valider des modèles d'un système à partir d'essais, par l'évaluation de l'écart entre les performances mesurées et les performances calculées ou simulées ;
- de prévoir les performances d'un système à partir de modélisations, par l'évaluation de l'écart entre les performances calculées ou simulées et les performances attendues au cahier des charges ;
- d'analyser ces écarts et de proposer des solutions en vue d'une amélioration des performances.



L'identification et l'analyse des écarts présentés mobilisent des compétences transversales qui sont développées en sciences industrielles pour l'ingénieur, mais aussi en mathématiques et en sciences physiques.

Les sciences industrielles pour l'ingénieur constituent donc un vecteur de coopération interdisciplinaire et participent à la poursuite d'études dans l'enseignement supérieur.

### **OBJECTIFS GENERAUX:**

L'enseignement des connaissances en Sciences Industrielles pour l'ingénieur repose sur l'analyse et la critique des systèmes industriels existants. Celles-ci permettent, d'une part, d'analyser les besoins, la structure, l'évolution, la modélisation de l'existant et, d'autre part, d'analyser des architectures définies par un cahier des charges.

Les compétences développées en sciences industrielles pour l'ingénieur forment un tout cohérent, en relation directe avec la réalité industrielle qui entoure l'élève. Couplées à la démarche de l'ingénieur, elles le sensibilisent aux travaux de recherche, de développement et d'innovation.

Ces compétences sont :

- **Analyser** : permet des études fonctionnelles, structurelles et comportementales des systèmes conduisant à la compréhension de leur fonctionnement et à une justification de leur architecture. Via les activités expérimentales, elles permettent d'acquérir une culture des solutions industrielles qui facilitent l'appropriation de tout système nouveau. Cette approche permet de fédérer et assimiler les connaissances présentées dans l'ensemble des disciplines scientifiques de classes préparatoires aux grandes écoles.
- **Modéliser** : permet d'appréhender le réel et d'en proposer, après la formulation d'hypothèses, une représentation graphique, symbolique ou équationnelle pour comprendre son fonctionnement, sa structure et son comportement. Le modèle retenu permet des simulations afin d'analyser, de vérifier, de prévoir et d'améliorer les performances d'un système.
- **Résoudre** : permet de donner la démarche pour atteindre de manière optimale un résultat. La résolution peut être analytique ou numérique. L'outil de simulation numérique permet de prévoir les performances de systèmes complexes en s'affranchissant de la maîtrise d'outils mathématiques spécifiques.
- **Expérimenter** : permet d'appréhender le comportement des systèmes, de mesurer, d'évaluer et de modifier les performances. Les activités expérimentales sont au coeur de la formation et s'organisent autour de produits industriels instrumentés ou de systèmes didactisés utilisant des solutions innovantes. Elles permettent de se confronter à la complexité de la réalité industrielle, d'acquérir une culture des solutions technologiques, de formuler des hypothèses pour modéliser le réel, d'en apprécier leurs limites de validité, de développer le sens de l'observation, le goût du concret et la prise d'initiative.
- **Concevoir** : permet de modifier l'architecture des systèmes pour satisfaire un cahier des charges. Elle permet également de faire évoluer le comportement des systèmes. Elle développe l'esprit d'initiative et la créativité des élèves.
- **Communiquer** : permet de décrire, avec les outils de la communication technique et l'expression scientifique et technologique adéquate, le fonctionnement, la structure et le comportement des systèmes.

### III - ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT

- **Cours – TD** : 2 heures hebdomadaires programmées, de préférence, le matin.
- **Travaux pratiques** : 2 heures hebdomadaires par demi-classe découpée en groupes de binômes

Les travaux pratiques se réfèrent aux différentes parties du programme. Ils sont organisés autour de produits industriels instrumentés, de matériels didactisés constitués de composants industriels ou de logiciels de simulation d'analyse et de calcul. Ils permettent de découvrir la réalité des solutions techniques, de vérifier des performances, de valider des concepts de base abordés dans les cours magistraux ou d'apporter des connaissances nouvelles. Ils nécessitent des activités sur des systèmes industriels.

Au terme des deux années préparatoires, cette activité doit permettre d'acquérir les compétences suivantes (Voir détails sur l'annexe de la page 8) :

- S'approprier le fonctionnement d'un système pluritechnologique ;
- Proposer et justifier un protocole expérimental ;
- Mettre en oeuvre un protocole expérimental ;
- Mettre en oeuvre une démarche de résolution numérique.
- Modifier les paramètres et enrichir le modèle pour minimiser l'écart entre les résultats simulés et les réponses mesurées ;
- Vérifier la cohérence des résultats d'expérimentation avec les valeurs souhaitées du cahier des charges ;
- Vérifier la cohérence du modèle choisi avec des résultats d'expérimentation ;
- Vérifier la cohérence du modèle choisi avec les valeurs souhaitées du cahier des charges.

L'activité T.P doit se **dérouler dans un labo de S.I.**

- **T.I.P.E** : 2 heures hebdomadaires.
- **Colles** : 0.5 heure hebdomadaire par élève en groupe de trois.

### IV- PROGRAMME

Les connaissances sont précisées dans la colonne de gauche, tandis que les compétences attendues accompagnées de commentaires figurent dans la colonne de droite.

#### **N.B** :

- La nature des sciences industrielles pour l'ingénieur et du contexte évolutif de son enseignement, nécessite une recherche permanente de l'innovation et de l'originalité pédagogique à même d'intégrer efficacement cette évolution rapide. Dans ce sens, le professeur est libre d'utiliser les méthodes d'enseignement qu'il juge adéquates, sans pour autant s'écarter des deux principes suivants :
  - ✓ privilégier la mise en activités des élèves et éviter le dogmatisme ;
  - ✓ recourir à la mise en contexte des connaissances, des savoir-faire et des systèmes étudiés ;
- Le séquençement proposé n'a pas pour objet d'imposer une chronologie dans l'étude du programme.

<p><b>1. Dynamique des solides</b></p> <p>1.1) Cinétique</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Masse, centre d'inertie, principe de conservation de la masse ;</li> <li>- Opérateur d'inertie en un point : définition, matrice d'inertie, directions principales, influence de la symétrie matérielle sur la forme de la matrice d'inertie. Théorème d'Hyghens ;</li> <li>- Torseur cinétique : définition, expression dans le cas du solide indéformable ;</li> <li>- Torseur dynamique : définition, relation entre le moment cinétique et le moment dynamique ;</li> <li>- Energie cinétique : définition, expression dans le cas du solide indéformable ; notion d'inertie équivalente.</li> </ul> <p>1.2) Dynamique</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Principe fondamental de la dynamique dans un repère galiléen ;</li> <li>- Théorèmes généraux ;</li> <li>- Applications : Solide en rotation autour d'un axe fixe (Notion d'équilibrage statique et dynamique)...</li> </ul> <p>1.3) Théorème de l'énergie/puissance :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Puissance des efforts extérieurs à un système en mouvement par rapport à un repère ;</li> <li>- Cas particulier du solide indéformable.</li> <li>- Puissance des efforts intérieurs à un système de solides indéformables.</li> <li>- Perte d'énergie ;</li> <li>- Rendement d'une chaîne d'énergie en régime permanent ;</li> <li>- Théorème de l'énergie cinétique dans un</li> </ul>	<p>La détermination du centre d'inertie des solides de <i>formes simples</i> se fera par :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- l'application de la définition du centre d'inertie</li> <li>- l'utilisation du théorème de GULDIN.</li> </ul> <p>La détermination du centre d'inertie d'un solide composé se fera par application de la formule du barycentre.</p> <p>Le calcul des moments et produits d'inertie de solide simple se fera à titre d'exemple illustratif d'application de la définition de l'opérateur d'inertie. Dans ce sens il faut signaler aux élèves que :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Les calculs de ces éléments d'inertie <b>ne donnent pas lieu à évaluation.</b></li> <li>• La relation entre la forme de la matrice d'inertie et la géométrie de la pièce est exigible.</li> </ul> <p>Pour les solides composés :</p> <p>Les matrices d'inertie des solides usuels en leurs centres d'inertie étant données, l'étudiant doit être capable de déterminer la matrice d'inertie d'un solide composé.</p> <p>Un modèle de système de solides étant fourni, l'étudiant doit être capable de déterminer les torseurs cinétique et dynamique et l'énergie cinétique d'un ensemble de solides en mouvement par rapport à un référentiel.</p> <p>Un modèle de système de solides, en liaisons isostatiques étant fourni, l'étudiant doit être capable de :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Proposer ou compléter une méthode permettant de déterminer les inconnues de liaison ou les efforts extérieurs spécifiés dans le cas où le mouvement est imposé ;</li> <li>- Proposer ou compléter une démarche permettant de déterminer la loi du mouvement dans le cas où les efforts extérieurs sont connus ;</li> <li>- Choisir une méthode pour déterminer la valeur des paramètres conduisant à des positions d'équilibre.</li> </ul> <p>Les compétences acquises doivent permettre de :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Associer les grandeurs physiques (Effort et flux) aux échanges d'énergie et à la transmission de puissance ;</li> <li>- Identifier les pertes d'énergie ;</li> <li>- Évaluer le rendement d'une chaîne d'énergie en régime permanent ;</li> <li>- Déterminer la puissance des actions mécaniques extérieures à un solide ou à un ensemble de solides, dans son mouvement rapport à un autre solide ;</li> <li>- Déterminer la puissance des actions mécaniques intérieures à un ensemble de solides ;</li> </ul>
--	---

<p>repère galiléen : pour un solide et pour un ensemble de solides.</p> <p><b>2. AUTOMATIQUE</b></p> <p>2.1) Généralités et définitions</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Introduction ;</li> <li>- Commande en chaîne directe ;</li> <li>- Commande avec retour ;</li> <li>- Définition et structure d'un système asservi : <ul style="list-style-type: none"> <li>• chaîne directe, capteur, commande, consigne, comparateur, correcteur écart et perturbation ;</li> <li>• Régulation et poursuite.</li> </ul> </li> <li>- Définition des performances : rapidité, précision et stabilité.</li> <li>- Signaux canoniques d'entrée : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Impulsion ;</li> <li>• Echelon ;</li> <li>• Rampe ;</li> <li>• Signaux sinusoïdaux.</li> </ul> </li> </ul> <p>2.2) Modélisation par équations différentielles, et comportement des systèmes linéaires continus et invariants :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Définition du système linéaire continu et invariant ;</li> <li>- Non-linéarités (hystérésis, saturation, seuil) ;</li> <li>- Linéarisation des systèmes non linéaires ;</li> <li>- Calcul symbolique (Transformée de Laplace) ;</li> <li>- Représentation par fonction de transfert, forme canonique, gain, ordre, classe, pôles et zéros ;</li> <li>- Représentation par schémas-blocs : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transformation et réduction de schémas blocs ;</li> <li>• Fonction de transfert de la chaîne directe, fonction de</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Déterminer l'équation différentielle issue du théorème de l'énergie cinétique pour déterminer une inconnue (Effort ou loi de mouvement). La résolution des équations différentielles de la dynamique peut être conduite indirectement par des logiciels adaptés. L'accent est alors mis sur la modélisation, l'acquisition correcte des données et sur l'exploitation des résultats.</li> </ul> <p>Les compétences acquises doivent permettre de :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Identifier la structure d'un système asservi : chaîne directe, capteur, commande, consigne, comparateur, correcteur ;</li> <li>- Décrire l'évolution des grandeurs ;</li> <li>- Identifier et positionner les perturbations ;</li> <li>- Différencier régulation et poursuite ;</li> <li>- Repérer et justifier les constituants dédiés aux fonctions d'un système ;</li> <li>- Vérifier l'homogénéité et la compatibilité des flux entre les différents constituants ;</li> <li>- Identifier la nature et les caractéristiques des flux échangés.</li> </ul> <p>L'enseignant insistera sur la justification de l'asservissement par la présence de perturbations.</p> <p>Caractériser les signaux canoniques d'entrée</p> <p>La linéarisation d'un modèle non linéaire se fera autour d'un point de fonctionnement.</p> <p>L'utilisation de la transformée de Laplace ne nécessite aucun prérequis. Sa présentation se limite à son énoncé et aux propriétés du calcul symbolique strictement nécessaires à ce cours.</p> <p>Les propriétés de la transformée de Laplace ainsi que les théorèmes de la valeur finale, de la valeur initiale et du retard doivent être donnés sans démonstration.</p> <p>À partir d'un système asservi modélisé comme linéaire, continu et invariant ou matérialisé par une réalisation industrielle, les compétences acquises doivent permettre de :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Déterminer les fonctions de transfert à partir d'équations physiques (modèle de connaissance) ;</li> <li>- Analyser ou établir le schéma-bloc du système ;</li> <li>- Déterminer la fonction de transfert en boucle</li> </ul>
--	--

<p>transfert en boucle ouverte et fonction de transfert en boucle fermée.</p> <p>2.3) Modèles de comportement d'un système</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- De premier ordre ;</li> <li>- De deuxième ordre ;</li> <li>- Dérivateur ;</li> <li>- Intégrateur ;</li> <li>- Gain ;</li> <li>- Retard.</li> </ul> <p>2.4) Réponses temporelles et fréquentielles d'un système de :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Premier ordre fondamental ;</li> <li>- Deuxième ordre fondamental ;</li> <li>- Intégrateur.</li> </ul> <p>* <u>Réponse temporelle</u> :</p> <p style="padding-left: 40px;">temps de réponse à 5% ;</p> <p>* <u>Réponse fréquentielle</u> :</p> <p style="padding-left: 40px;">diagrammes de Bode et Bande passante.</p> <p>2.5) Pôles dominants et réduction de l'ordre du modèle :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Principe ;</li> <li>- Justification.</li> </ul> <p>2.6) Performances :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Rapidité ; <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temps de réponse à 5 % ;</li> <li>• Bande passante.</li> </ul> </li> <li>- Précision d'un système asservi : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Définition de la précision en régime permanent ;</li> <li>• Précision en régime permanent pour une entrée en échelon et une entrée en rampe ;</li> </ul> </li> </ul>	<p>ouverte et en boucle fermée du système.</p> <p>Un modèle de comportement est associé à une réponse expérimentale donnée. Seule la connaissance de la réponse temporelle à un échelon est exigible.</p> <p>D'un point de vue fréquentiel, seul le diagramme de Bode est développé pour l'identification d'un modèle de comportement. Seul le diagramme de Bode est au programme.</p> <p>On rappellera les techniques de détermination du temps de réponse à 5% et de la bande passante pour un système du premier et du deuxième ordre fondamental.</p> <p>Les compétences attendues doivent permettre de :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Donner l'allure de la réponse (temporelle et fréquentielle) attendue des modèles élémentaires ;</li> <li>- Identifier les paramètres caractéristiques d'un modèle du premier ordre ou du deuxième ordre à partir de sa réponse indicielle ( Les abaques nécessaires à l'identification sont fournis) ;</li> <li>- Identifier les paramètres caractéristiques d'un modèle de comportement à partir de sa réponse fréquentielle ;</li> <li>- Tracer le diagramme asymptotique de Bode d'un produit de transmittances élémentaires.</li> </ul> <p>L'étudiant doit être capable de réduire l'ordre de la fonction de transfert selon l'objectif visé, à partir des pôles dominants qui déterminent la dynamique asymptotique du système.</p> <p>L'étudiant doit être capable de :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Prévoir les performances en termes de rapidité,</li> <li>- Relier la rapidité aux caractéristiques fréquentielles.</li> </ul> <p>Il faut insister sur la nécessité de comparer des grandeurs homogènes, par exemple la nécessité d'adapter la sortie et sa consigne. L'amélioration des performances apportée par la fermeture de la boucle est illustrée.</p> <p>Les compétences attendues doivent permettre de :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Déterminer l'erreur en régime permanent vis-à-vis d'une entrée en échelon ou en</li> </ul>
---	--

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Influence de la classe de la fonction de transfert en boucle ouverte.</li> </ul> <p>- Stabilité :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Définition entrée bornée - sortie bornée (EB-SB) ;</li> <li>• Equation caractéristique : condition de stabilité ;</li> <li>• Position des pôles dans le plan complexe ;</li> <li>• Critères de stabilité : <ul style="list-style-type: none"> <li>* critère algébrique de Routh ;</li> <li>* critère graphique du revers dans le plan de Bode ;</li> <li>* Stabilité pratique : marges de stabilité (de gain et de phase).</li> </ul> </li> </ul> <p>2.7) Amélioration des performances d'un système asservi : correction</p> <p>- Notions sur la correction des systèmes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Action proportionnelle ;</li> <li>• Action intégrale ;</li> <li>• Action dérivée.</li> </ul> <p>- Réglage du correcteur proportionnel ;</p> <p>- Réglage du correcteur proportionnel intégral (P.I) ;</p> <p>- Réglage du correcteur à avance de phase.</p>	<p>rampe (consigne ou perturbation) ;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Relier la précision aux caractéristiques fréquentielles ;</li> </ul> <p>Il faut insister sur le fait qu'un système perturbé conserve la même équation caractéristique dans le cas de perturbations additives.</p> <p>Le critère algébrique de ROUTH est limité aux équations caractéristiques ne dépassants pas le troisième ordre.</p> <p>On insistera sur l'influence du gain en boucle ouverte sur la stabilité, la rapidité et la précision.</p> <p>Les compétences requises devront permettre de :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Décider de la stabilité d'un système à partir de l'équation caractéristique ;</li> <li>- Déterminer les paramètres permettant d'assurer la stabilité du système ;</li> <li>- Relier la stabilité aux caractéristiques fréquentielles ;</li> <li>- Déterminer, analytiquement et graphiquement, ses marges de stabilité.</li> </ul> <p>Les relations entre les paramètres de réglage fournies, l'étudiant doit être capable de :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Choisir un type de correcteur adapté ;</li> <li>- Proposer la démarche de réglage d'un correcteur proportionnel, proportionnel intégral et à avance de phase ;</li> <li>- Déterminer les paramètres d'un correcteur proportionnel, proportionnel intégral et à avance de phase ;</li> <li>- Réaliser une intégration et une dérivation sous une forme numérique (somme et différence en activité de TP).</li> </ul>
--	--

**Annexe :**

<b>Compétences</b>	<b>Détails</b>
<b>S'approprier le fonctionnement d'un système pluritechnologique.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Repérer les différents constituants de la chaîne d'énergie ;</li> <li>✓ Repérer les différents constituants de la chaîne d'information ;</li> <li>✓ Régler les paramètres de fonctionnement d'un système ;</li> <li>✓ Mettre en évidence l'influence des paramètres sur les performances du système.</li> </ul>
<b>Proposer et justifier un protocole expérimental.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Prévoir l'allure de la réponse attendue ;</li> <li>✓ Prévoir l'ordre de grandeur de la mesure ;</li> <li>✓ Choisir les configurations matérielles du système en fonction de l'objectif visé ;</li> <li>✓ Choisir la grandeur physique à mesurer ou justifier son choix ;</li> <li>✓ Choisir les entrées à imposer pour identifier un modèle de comportement ;</li> <li>✓ Introduire, pour une chaîne d'acquisition, les notions de filtrage et d'échantillonnage en vue de justifier la chaîne d'acquisition utilisée et de prévoir la quantification nécessaire à la précision souhaitée.</li> </ul>
<b>Mettre en oeuvre un protocole expérimental.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Mettre en oeuvre un système complexe en respectant les règles de sécurité ;</li> <li>✓ Appréhender l'influence de la fréquence d'échantillonnage sur les mesures effectuées ;</li> <li>✓ Régler les paramètres de fonctionnement d'un système ;</li> <li>✓ Mesurer les grandeurs d'effort et de flux à travers les constituants de la chaîne d'énergie (Source, modulateur, actionneur et chaîne de transmission) ;</li> <li>✓ Quantifier les pertes dans les constituants d'une chaîne d'énergie ;</li> <li>✓ Générer un programme et l'implanter dans le système cible ;</li> <li>✓ Extraire les grandeurs désirées et les traiter afin de construire un modèle de comportement du système.</li> </ul>
<b>Mettre en œuvre une démarche de simulation et de résolution numérique.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Choisir les valeurs des paramètres de la résolution numérique : durée et pas de calcul ;</li> <li>✓ Choisir les tracés des grandeurs physiques en fonction des performances à vérifier ;</li> <li>✓ Choisir les paramètres de simulation ;</li> <li>✓ Faire varier un paramètre et comparer les courbes obtenues.</li> </ul>