



POLYTECHNIQUE  
MONTRÉAL

## Questionnaire examen final

**IND6240**

Sigle du cours

<i>Identification de l'étudiant(e)</i>		
Nom :	Prénom :	
Signature :	Matricule :	Groupe :

<i>Sigle et titre du cours</i>			
IND6240-Industrie 4.0			
<i>Professeur</i>	<i>Téléphone</i>	<i>Groupe</i>	<i>Trimestre</i>
Christophe Danjou		01	Automne 2024
<i>Jour</i>	<i>Date</i>	<i>Durée</i>	<i>Heures</i>
Mardi	03 décembre 2024	2h50	16h-18h50
<i>Documentation</i>		<i>Calculatrice</i>	<i>Outils électroniques</i>
<input type="checkbox"/> Aucune <input type="checkbox"/> Toute <input checked="" type="checkbox"/> Voir directives particulières		<input type="checkbox"/> Aucune <input checked="" type="checkbox"/> Toutes <input type="checkbox"/> Non programmable (AEP)	Les appareils électroniques personnels sont interdits.
<i>Directives particulières</i>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Par soucis d'équité, le professeur ne répondra à aucune question durant cet examen. Si vous estimez que vous ne pouvez pas répondre à une question pour diverses raisons, veuillez le justifier puis passer à la question suivante.</li> <li>• Assurez-vous que vos réponses soient suffisamment lisibles pour le correcteur.</li> <li>• <u>Toute documentation papier est autorisée.</u></li> </ul>			

<b>Important</b>	Cet examen contient <input type="text" value="8"/> questions sur un total de <input type="text" value="7"/> pages (excluant cette page).
	La pondération de cet examen est de 60 %
	Vous devez répondre sur : <input type="checkbox"/> le questionnaire <input checked="" type="checkbox"/> le cahier <input type="checkbox"/> les deux
	Vous devez remettre le questionnaire : <input checked="" type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non

L'étudiant doit honorer l'engagement pris lors de la signature du code de conduite.

**Exercice 1 :**

L'entreprise « Le pain enchanté » est une boulangerie industrielle à très gros volume qui fabrique toute sorte de pain. Les pains sont fabriqués pour différents clients, notamment de grands restaurants étoilés, des boulangeries, des restaurations d'entreprises... Si pour les restaurations d'entreprises il s'agit essentiellement de produire du pain sans peu de contraintes sur les caractéristiques, en revanche pour les restaurants étoilés et les boulangeries, les recettes demandent une très grande précision. De plus, la réputation de l'entreprise étant chaque jour améliorée, les cadences de production augmentent et une erreur dans les recettes, entrainerait automatiquement un rejet et ne permettrait plus à l'entreprise d'honorer ses commandes.

D'un point de vue processus, l'entreprise dispose de 3 lignes de production totalement identiques qui se composent de :

- Un mélangeur qui constitue la partie de la machine qui permet de sélectionner la quantité de matière première avec très grande précision (capteur d'ouverture/fermeture des valves, capteurs de température, balances, etc.) ainsi que des bras physiques pour effectuer le mélange. Le tout est présentement contrôlé par l'opérateur via l'interface HMI au niveau du contrôleur machine.
- Un « vaisseau » dans lequel s'effectue le mélange pour obtenir la pâte à pain une fois que tous les ingrédients ont été mélangés. Une fois le pétrissage effectué, le « vaisseau » est stocké pendant 2 à 6h dépendamment de la recette choisie.
- Une fois les temps de repos respectés, le « vaisseau » est mis en place dans une seconde machine qui va automatiquement façonner le pain. Une fois le pain façonné, il est disposé sur des alvéoles ou tapis prévus à cet effet avant qu'ils soient enfournés dans un four industriel à très grande capacité.
- Une fois cuit, le pain est emballé individuellement puis entreposé en attente de l'expédition qui est généralement programmée très peu de temps après pour livrer le pain d'une qualité exceptionnelle.

Malgré ce beau processus, des erreurs entre 2 « vaisseaux » arrivent fréquemment aussi bien au niveau des matières premières qu'après le pétrissage, causant ainsi de nombreux retard.

**Question 1 :** Quelle solution proposeriez-vous afin d'identifier précisément les « vaisseaux » et ainsi éviter toute confusion entre plusieurs « vaisseaux » ? *Justifier.* (2 points)

Après la mise en place de cette solution de traçabilité, on s'aperçoit d'une autre problématique ne permettant pas de maîtriser totalement les recettes. En effet, bien que les balances et les buses d'arrivées de matière première soient contrôlées par des valves très précises, l'opérateur fait régulièrement des erreurs (dus à la très forte ressemblance des recettes) qui parfois peuvent avoir des conséquences importantes sur certaines commandes, notamment pour les restaurants étoilés.

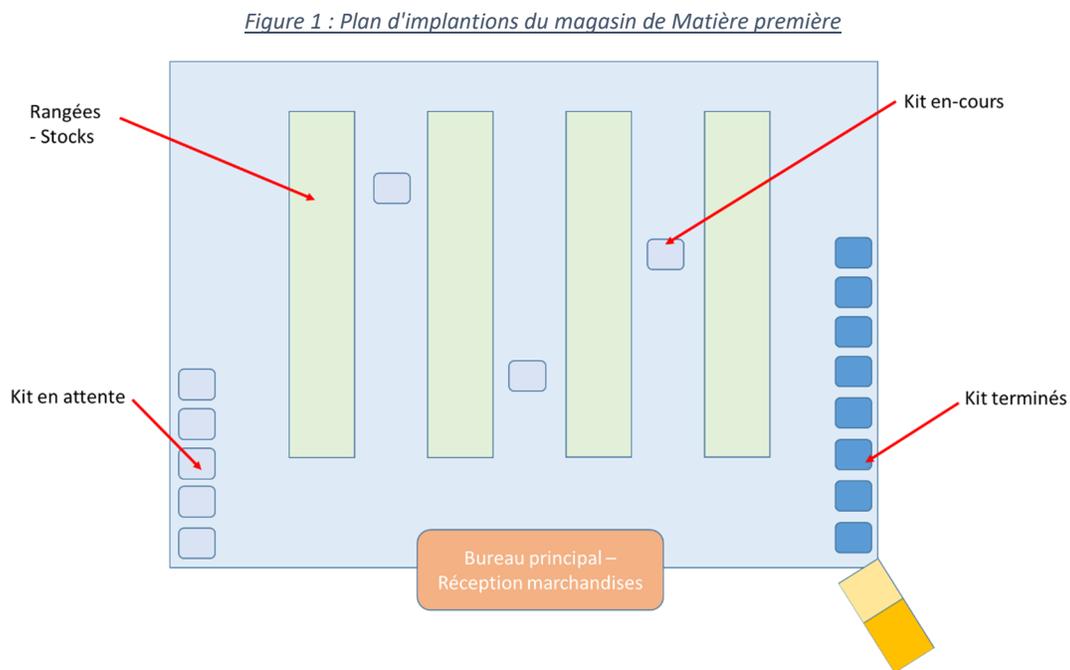
**Question 2 :** En vous inspirant de cas vus dans le cadre du cours, proposer une solution de gestion pour automatiser l'ajout des matières premières en fonction des recettes. Attention toutefois à ce que l'opérateur conserve une pleine visibilité et possibilité d'action sur les automates. (3 points)

**Question 3 :** Pour compléter la réponse à la question 2, proposer une architecture technique exhaustive et standardisée d'interopérabilité des systèmes et d'échange de données pour rendre ce processus autonome en allant de l'approvisionnement en matière première jusqu'à l'expédition vers le client. (6 points)

## **Exercice 2 :**

L'entreprise « Toujours-au-frais » fabrique des systèmes d'air climatisé industriel et résidentiel. L'entreprise propose une vaste gamme de produits. Bien que ces produits ne soient pas très complexes dans leur conception, le grand nombre de références et l'encombrement de certains sous-ensembles (rotor par exemple) engendrent de nombreux problèmes de logistique.

On dénombre au niveau du magasin de matière première, qui s'occupe notamment de la réception des marchandises, plus de 10 000 références. Suite à plusieurs chantiers d'améliorations continues et au vu de l'impossibilité de stocker toutes ces références en bord de ligne, il a été décidé de basculer sur un fonctionnement en mode picking / kitting. Ainsi on parcourt le magasin, disposé comme indiqué sur la Figure 2 pour la constitution des kits. Un opérateur passe en moyenne 15 minutes pour la constitution du Kit, ce temps étant globalement lié à la distance à parcourir dans le magasin.



Jusqu'à peu, les opérations de Kitting étaient totalement effectuées manuellement, mais suite à plusieurs accidents et l'identification de risques liés aux positions et surcharges pouvant entraîner des troubles musculo-squelettiques, les opérateurs de logistiques ont à disposition des robots qu'ils pilotent pour attraper les charges lourdes ou en position haute. Bien que ce système ait permis de réduire considérablement le risque de troubles musculo-squelettique, le temps de constitution des kits a augmenté à 19 minutes, soit une perte sèche de 4 minutes. Ce retard tend à retarder le départ du petit train pour l'envoi des kits terminés en production et on observe régulièrement des arrêts de production pour des pièces manquantes.

Vous êtes nouvellement embauché comme ingénieur industriel par « IND6240 Consultant » avec de solides connaissances sur la transformation numérique des processus. Consciente du virage numérique que l'entreprise « Toujours-au-frais » doit prendre, mais surtout démunie par rapport à comment

l'aborder, celle-ci est venue vous solliciter pour que vous l'accompagniez dans cette transformation numérique a minima au niveau du magasin : chantier qu'ils identifient comme prioritaire)

**Question 4** : Détailler, sans entrer dans les détails technologiques, les approches et démarches que vous allez mettre en œuvre. (4 points)

**Question 5** : Proposer un calendrier à un niveau macro de ce que vous venez de proposer à la question 4. (3 points)

### **Exercice 3 :**

L'entreprise Graininja est une entreprise spécialisée dans la transformation céréalière. Graininja se spécialise dans la production d'huile et de farine à base de graines de soja. L'huile a pour cible une consommation humaine et la farine, une consommation animale.

L'industrie agroalimentaire est sujette à de nombreuses régulations et à un contrôle strict de la qualité et de la traçabilité des produits. Les cas d'empoisonnement alimentaires sont pris très au sérieux et peuvent signifier la fermeture immédiate de tout site de production. Il est donc fondamental pour Graininja de contrôler la qualité de ses produits tout en restant rentable et en optimisant les processus de transformation.

#### La matière première :

Étant donné que la matière première du processus de fabrication est vivante et qu'elle se déplace sous forme de flux continu, il n'est pas possible de la tracer avec des technologies AIDC standard. Il faut donc contrôler la matière première avant qu'elle rentre dans le processus et contrôler les conditions externes de transformation tout au long du processus.

Afin de contrôler les matières premières, il faut d'abord identifier les paramètres pour les classer. Des études ont démontré que les caractéristiques clés pour la classification des grains de soja sont l'humidité ( $\phi$ ) le taux de protéines ( $\rho$ ) et l'acidité ( $\alpha$ ). De plus, avec l'expérience Graininja a aussi remarqué que la température ( $\theta$ ), les dimensions (diamètre principal et secondaire :  $\phi_p$  et  $\phi_s$ ) des grains, mais aussi le taux de chargement (débit d'alimentation des machines en grains :  $V_a$ ) sont des facteurs importants pour leur processus d'extraction d'huile. La **Figure 2** résume toutes les caractéristiques propres aux grains ainsi que la symbologie utilisée pour la suite du sujet.

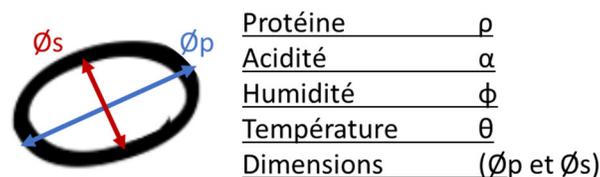


Figure 2 : Caractéristiques de grains de soja

#### Processus :

Le processus d'extraction d'huile de soja est complexe. Afin de garantir le meilleur taux d'extraction possible, la qualité de la matière première doit être contrôlée à chaque étape de la production. De ce fait, le site de production gère l'entièreté du processus de fabrication : de la réception des grains à l'extraction de l'huile, la récupération de la farine et le conditionnement des deux produits. La figure 2 synthétise les étapes clés de la transformation. La manutention est réalisée soit par des camions soit par des convoyeurs et est schématisée sur la figure 3 entre chaque étape du processus.

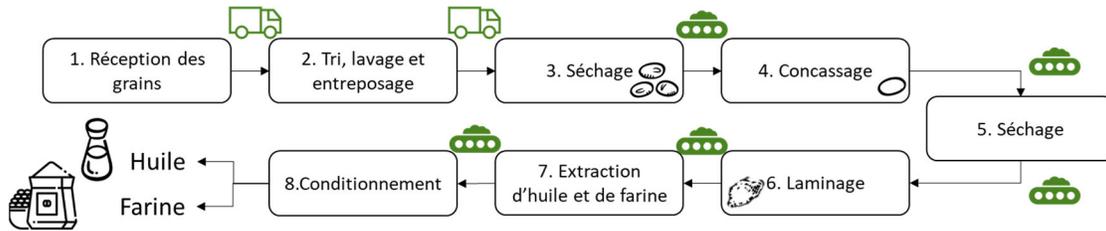


Figure 3 : processus global de production

1. Les grains arrivent directement des producteurs par camion, des échantillons sont prélevés puis envoyés en laboratoire;
2. Selon le retour du laboratoire, les grains sont triés, lavés puis entreposés dans des silos. À ce stade Graininja connaît  $\rho$ ,  $\alpha$ .
3. Lorsqu'il y a un besoin de la production, les grains sont sortis du silo, passent par un tamis qui contrôle les dimensions  $\varnothing_p$  et  $\varnothing_s$  et sont envoyés sur un convoyeur. Les grains sont alors séchés en même temps qu'ils sont transportés par le convoyeur. Les grains doivent être chauffés idéalement entre 60 C et 65 C, mais ne doivent en aucun cas être en dessous de 50 C ou dessus de 70 C. Les paramètres contrôlés ici sont  $\theta$ ,  $\phi$ ,  $\varnothing_p$  et  $\varnothing_s$ .
4. Les grains sont ensuite concassés via 1 paire de rouleaux sur l'un des 4 concasseurs possibles. Le seul paramètre contrôlé est le débit de matières premières  $V_a$  grâce à une caméra.
5. Les grains se retrouvent à nouveau sur un convoyeur et sont séchés à nouveau. Les grains doivent être chauffés idéalement entre 60 C et 65 C, mais ne doivent en aucun cas être en dessous de 50 C ou dessus de 70 C (idem que l'étape 3). Les paramètres contrôlés ici sont  $\theta$  et  $\phi$ .
6. Les grains sont ensuite laminés via 2 paires de rouleaux sur l'un des 6 lamineurs possibles. Paramètre contrôlé  $V_a$  via caméra.
7. De cette pâte de soja on peut enfin extraire de l'huile
8. L'huile et la farine sont ensuite conditionnées avant d'être expédiées.

L'entreprise fonctionne en 24/7 sous la forme de 3 quarts de travail de 8h.

- Quart de jour : 7h-15h
- Quart de soir : 15h-23h
- Quart de nuit : 23h-7h

Tous les capteurs présents sur les convoyeurs partagent leurs informations avec un système centralisé (noté SC) dans la salle de contrôle. Les caméras du centre de concassage (1 caméra par machine) sont toutes reliées à un poste présent sur site (noté PConc). Ce poste retransmet ces informations au serveur. Idem, les caméras du centre de laminage (1 caméra par machine) sont toutes reliées à un poste sur site (PLam).

La figure 4 synthétise les informations sous la forme du plan de l'entreprise.

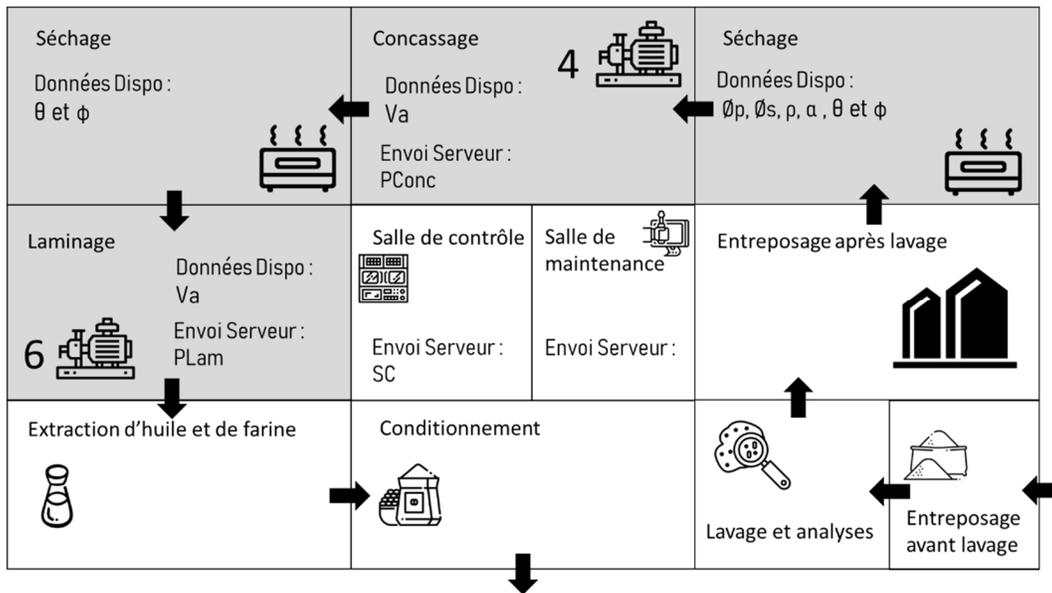


Figure 4 : Organisation du site de production

### Contexte de maintenance :

Après une analyse poussée de son processus de fabrication, Graininja a réalisé que les rouleaux en acier utilisés pour les concasseurs et lamineurs se déformaient de manière aléatoire sous l'effet de la température et que par conséquent, les rouleaux s'usaient de manière non homogène. Or, pour avoir un produit semi-fini optimal pour l'extraction d'huile, les rouleaux des concasseurs et des lamineurs doivent avoir une ligne de contact la plus droite possible. Graininja a donc investi dans un grand centre de maintenance pour pouvoir rectifier eux-mêmes les rouleaux en acier. Puisque Graininja fonctionne en 24/7 elle a aussi investi dans plus de paires de rouleaux que de machines pour limiter les pertes d'argent dû à un arrêt de production.

Cependant, Graininja à un parc machine important et elle ne peut pas avoir des ensembles de rouleaux en double pour toutes ces machines. De ce fait, une paire de rouleaux peut fonctionner sur des machines différentes. Le tableau 1 synthétise le nombre de rouleaux disponibles par type de machine.

Tableau 1 : Composants machines

Pièce de machine	Nombre de pièces de rechange
Rouleaux de concasseur	10 (5 paires)
Rouleaux de lamineurs	32 (16 paires)

Graininja peut déclencher une maintenance des rouleaux selon deux situations :

1. Les rouleaux sont installés sur la machine depuis plus de 6 mois
2. La machine tombe en panne et la cause de la panne est la déformation trop importante des rouleaux.

Les rouleaux ont donc des temps d'utilisation variables entre deux opérations de maintenance. Une autre contrainte est que Graininja doit se débarrasser des rouleaux après 3 ans d'utilisation et sans

certitudes que les rouleaux sont en fin de vie. C'est pourquoi on souhaite effectuer de la maintenance prédictive.

**Question 6** : En vous appuyant sur les 12 positionnements stratégiques vus en cours, précisez où vont se positionner les améliorations prévues avec cette maintenance prédictive. Justifier (3 points)

On fait désormais l'hypothèse que des avancées en recherche ont permis de développer des algorithmes pour permettre de prévoir les étapes de maintenances avant qu'elles ne se produisent. Ces algorithmes ont besoin de plusieurs données d'entrées telles que : écartement des rouleaux, vibrations des rouleaux, vitesse de rotation des rouleaux, le débit de grain ( $V_a$ ), les images vidéos (PLam).

Bien que ce nouvel algorithme constitue une avancée majeure et soit très prometteur pour Graininja, l'entreprise ne sera pas en mesure de faire fonctionner ces algorithmes localement dû à des limitations des moyens IT.

**Question 7** : Proposer une solution complète pour mettre en œuvre cette solution de maintenance prédictive. Détailler votre proposition et justifier vos choix. (5 points)

**Question 8** : Proposer un planning réaliste pour mettre en œuvre la solution précédente. Lister par la suite les ressources nécessaires à la mise en œuvre de cette solution. (4 points)