

UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA
TECHNOLOGIE D'ORAN- MB-

*Support
Pédagogique pour
les étudiants en
licence HSI''*

SECURITE DES INSTALLATIONS ET DES EQUIPEMENTS INDUSTRIELS



**Dr. BENKHEDJA
BENTATA Houaria**

2018

CONTENU DE LA MATIERE SELON LE CANEVAS MINISTERIEL

Chapitre 1

Rappel du contexte du dispositif normatif de la sécurité des installations et des équipements industriels

Chapitre 2

Technologie et définitions

Chapitre 3

Sécurité des installations

Chapitre 4

Sécurité des machines et équipements : distance de sécurité, protecteurs, autres dispositifs de sécurité (détecteurs, arrêts d'urgences,...)

Chapitre 5

Sûreté de fonctionnement des machines : Circuits de commandes automates programmables, systèmes instrumentés de sécurité

OBJECTIFS

Diagnostiquer les situations de dangers dans les installations ou bien lors de l'utilisation des machines, définir les zones de sécurité, comprendre le fonctionnement et l'usage des machines.

"NB : Ce document représente uniquement un support pédagogique pour le cours de la sécurité des installations et des équipements industriels destiné pour les étudiants en L3 HSI. "

QUELQUES NOTATIONS

APD : Analyse préliminaire des dangers

APR : Analyse préliminaire des risques

HAZID : HAZard Identifi cation - Identifi cation des risques

HAZOP : HAZard & Operability - Analyse des risques et opérabilité

LOPA : (Layer Of Protection Analysis) : principe, détermination des IPL (Independant Protection Layers), évaluation du besoin d'une SIF (Safety Instrumented Function), avec

SIL : (Safety Integrity Level) associé. Préparation et animation des revues.

APD : Analyse Préliminaire des Dangers,

AMDE : Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets,

MDS : Méthode du Diagramme de Succès, MTV Méthode de la Table de Vérité,

MAC : Méthode de l'Arbre des Causes,

MCPR : Méthode des Combinaisons de Pannes Résumées,

MACQ : Méthode de l'Arbre des Conséquences,

MDCC : Méthode du Diagramme Causes-Conséquences,

MEE : Méthode de l'Espace des Etats.

Chapitre 1

Rappel du contexte du dispositif normatif de la sécurité des installations
et des équipements industriels

1.1. RAPPEL

1.1.1 Sécurité

La sécurité peut être définie comme un état de confiance vis-à-vis de risques encourus. La sécurité peut concerner :

- La sécurité (individuelle),
- La sécurité des installations industrielles,
- La sécurité des produits.

La sécurité vise à réduire les risques, sur le plan environnemental, social, économique, générés par l'activité de l'entreprise sur un plus long terme.

Nous allons étudier seulement les aspects liés à la sécurité industrielle des équipements, des installations dont il faudra éviter la défaillance ou la détérioration. Les mesures de sécurité peuvent être classées en :

1. Mesures de sécurité actives : Elles ont pour but de réduire la probabilité des incidences, de réduire le nombre d'accidents, de la même façon que la prévention primaire réduit le risque de déclaration ou d'incidence des maladies ;
2. Mesures de sécurité passives : Elles ont pour but de réduire les conséquences des accidents, de la même façon que la prévention secondaire réduit les conséquences et les suites des maladies, une fois que celles-ci sont déclarées. Un exemple typique de sécurité passive est la ceinture de sécurité. La loi impose aux automobilistes de s'attacher à leur siège avec une ceinture de sécurité.

1.1.2 Installations

Une installation est constituée d'un ensemble d'appareils qui se trouvent dans un même lieu.

1.1.3 Équipements industriels

La notion d'équipement représente l'ensemble des accessoires fonctionnels, appareils ou machines.

En général des machines qui représentent un ensemble de pièces ou d'organes liés entre eux, dont au moins un est mobile, auxquels sont associés, selon les besoins, des actionneurs, des circuits de commande et de puissance, réunis de façon solidaire en vue d'une application définie, notamment pour la transformation, le traitement, le déplacement et le conditionnement d'un matériau.



Sécurité des installations et des équipements industriels

1.1.4 Process

Ensemble des étapes ou des réglages, secrets ou non, qui permettent le bon fonctionnement d'un procédé industriel.

1.1.5 Normalisation/réglementation

Le mot norme vient du latin « norma » qui désigne un état, moyen, considéré comme une règle à suivre. Le choix d'appliquer une norme est un acte volontaire du concepteur, du fabricant ou de l'utilisateur de matériel. Ainsi, il doit être clair que, lors de l'établissement d'une norme, même si des valeurs limites sont données, elles ne doivent être considérées que comme des valeurs de référence. Les spécifications techniques détaillées des produits ou des matériels auxquels elles s'appliquent. Elles visent à harmoniser uniquement les exigences essentielles auxquelles doivent satisfaire les produits pour un organisme de normalisation qu'il soit locale ou international comme :

Algérie : l'institut Algérien de Normalisation (IANOR)

France : l'institut Algérien de Normalisation (AFNOR)

Europe : CEN, CENELEC et l'ETSI...

ISO est considéré comme le principal organisme mondial de normalisation.

Exemples de normes :

Normes Algériennes

- NA 5268/NF P 98-086 :1992 travaux publics
- NA 464/NFP18-594: 2004 Granulats
- NA 778/NFP18-011:1985 Bétons
- NA 5225/EN 12606-2:1999 Bitumes

Normes canadiennes

- CSA Z432 Sécurité des machines
- CSA Z434 Sécurité des robots industriels
- CSA Z460 Maîtrise des énergies dangereuses

Normes américaines

- ANSI B11 Série de normes particulières à certaines machines

Une structuration en 3 niveaux :

Normes de type A : normes fondamentales de sécurité, contenant des notions fondamentales, des principes de conception et des aspects généraux relatifs aux machines

Normes de type B : normes qui traitent la sécurité des systèmes.

Normes de type C : normes de sécurité par catégorie de machines, qui traitent des spécifications de sécurité détaillées s'appliquant à une machine particulière ou à un groupe de machines

1.1.6 Iso :

C'est l'abréviation de l'Organisation internationale de normalisation (ISO), qui est classée par domaines. Certaines normes peuvent apparaître dans plusieurs domaines exemple :

- ISO 9000 : Systèmes de management de la qualité - principes essentiels et vocabulaire
- ISO 9001 : Systèmes de management de la qualité - Exigences
- ISO 9004 : Systèmes de management de la qualité - Lignes directrices pour l'amélioration des performances
- ISO 14001 : Système de management concernant l'environnement

1.1.7 Danger

Un danger, ou un phénomène dangereux représente toute situation dans laquelle une personne est exposée à une ou plusieurs causes capables de provoquer une lésion ou une atteinte à la santé.

Il faut faire la différence entre danger et risque, entre sécurité et sûreté.

1.1.8 Zone dangereuse

C'est toute zone située à l'intérieur ou autour d'une machine et qui présente un risque pour la santé, la sécurité ou l'intégrité physique des travailleurs.

1.1.9 Quelques phénomènes associés aux éléments à risque :

On peut citer : Batteries, Charges explosives, Fluides sous pression, Générateurs électriques, Pompes, Ventilateurs, Interrupteurs, dispositifs de mise en route, Énergie sous toutes ses formes, Catalyseurs chimiques, Combustibles, Conteneurs sous pression, Dispositifs de chauffage, Machines tournantes, Objets susceptibles de tomber, Etc.

1. DOMAINE MECANIQUE	Fissuration, Déformation, Usure, Corrosion sous tension, Oxydation, Précontraintes, Cisaillement, Frottement, Vibration, Adhérence, Réaction...etc.
2. DOMAINE "HYDRAULIQUE-PNEUMATIQUE- GAZ"	Coup de bélier, Onde de choc, Turbulence, Couplage fluide – Structure, Vaporisation, Condensation, Solidification...etc.
3. DOMAINE CHIMIQUE	Absorption, Auto-ignition, Ionisation, Électrolyse, Décomposition, Polymérisation, Affinité, Corrosion, Précipitation...etc.

1.2 TECHNOLOGIE

La technologie est l'étude des outils et des techniques. Le terme désigne tout ce qui peut être dit aux diverses périodes historiques sur l'état de l'art en matière d'outils et de savoir-faire. Il inclut l'art, l'artisanat, les métiers, les sciences appliquées et éventuellement les connaissances. Par extension, il désigne les systèmes ou méthodes d'organisation qui permettent telle ou telle technologie, ainsi que tous les domaines d'études et les produits qui en résultent.

1.2.1 Un schéma de procédé

Un schéma de procédé (*process flow diagram* ou PFD en anglais) est un diagramme utilisé en ingénierie (génie chimique, systèmes de transport, etc.) pour décrire les flux de matières et les équipements principaux d'un procédé. Seuls les équipements en contact direct avec les produits chimiques ainsi que les moyens de transport de ceux-ci (pompes, tuyaux,...) sont représentés.

1.2.2 Le schéma fonctionnel

Le schéma fonctionnel, appelé aussi schéma-bloc, schéma de principe ou en anglais block diagram, est la représentation graphique simplifiée d'un procédé relativement complexe impliquant plusieurs unités ou étapes. Il est composé de blocs connectés par des lignes d'action. Il est utilisé principalement en automatisme, en traitement du signal, en génie chimique et en fiabilité.

1.2.3 Schéma P&ID

Un schéma tuyauterie et instrumentation (en anglais Piping and instrumentation diagram ou Process and instrumentation diagram, abrégé P&ID) est un diagramme qui définit tous les éléments d'un procédé industriel. Il est le schéma le plus précis et le plus complet utilisé par les ingénieurs pour la description d'un procédé.

Il se distingue du schéma de procédé par l'ajout des éléments de contrôle, les armatures, les détails sur l'isolation et la protection des installations et la position coordonnées des installations les unes par rapport aux autres (Fig. 1.1).

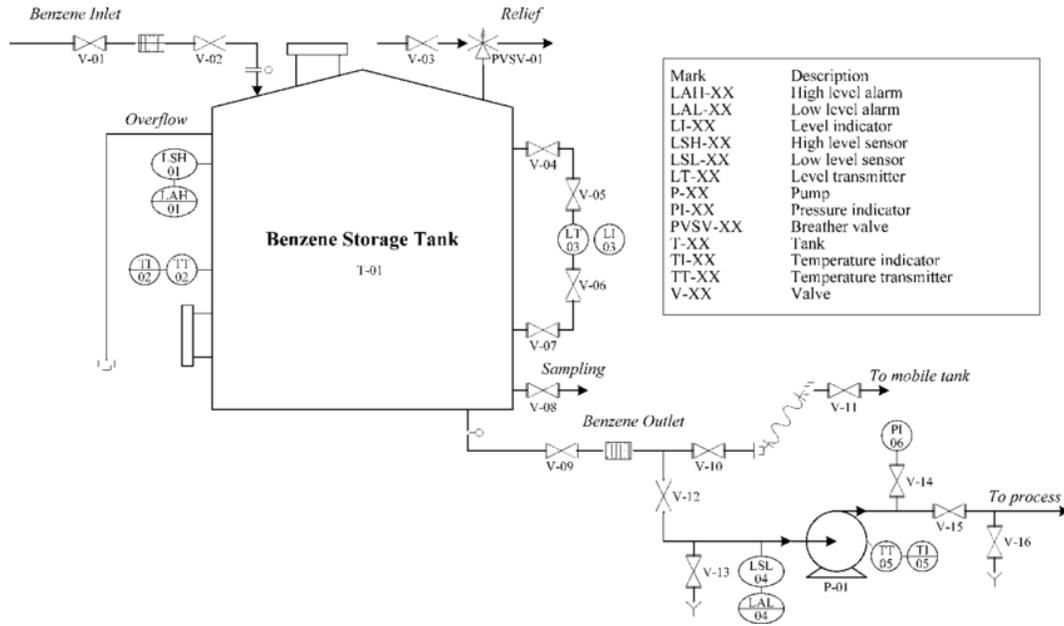
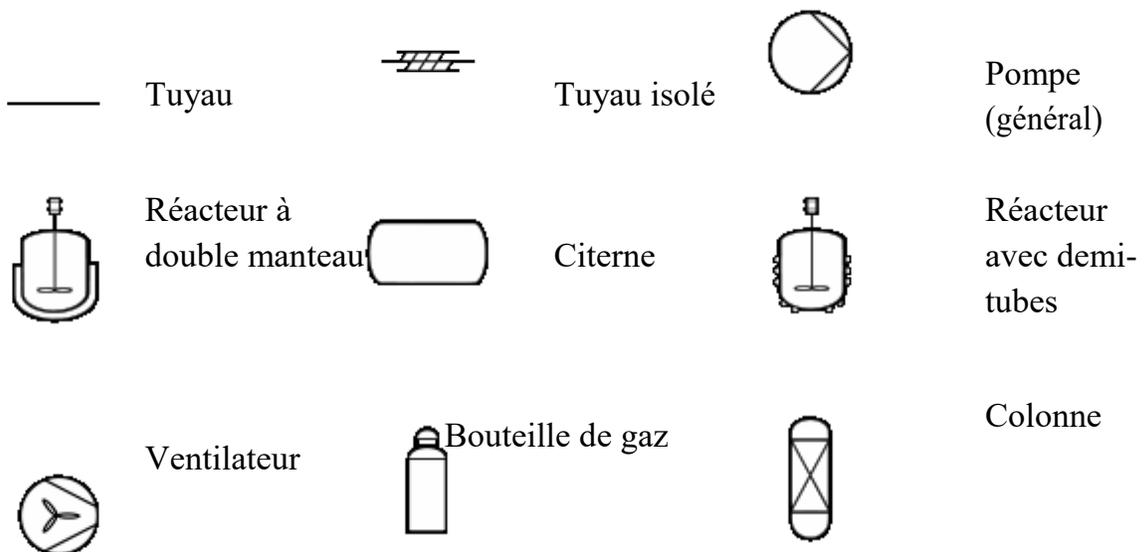


Figure 1.1 : Schéma PID d'un réservoir à toit flottant.

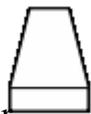
1.2.4 Symboles

Les installations ainsi que les vannes et les éléments de contrôle sont décrits par des symboles :





Four, incinérateur



Tour de refroidissement



Séchoir, évaporateur



Échangeur de chaleur



Échangeur de chaleur



Échangeur de chaleur à plaques



Vanne



Vanne de contrôle



Vanne manuelle

1.2.5 Notations

	Propriété mesurée	Indication	Enregistrement Contrôle	Contrôle Régulation	Affichage et Contrôle	
Débit (Flow rate)	F	FI	FR	FC	FIC	FRC
Niveau (Level)	L	LI	LR	LC	LIC	LRC
Pression (Pressure)	P	PI	PR	PC	PIC	PRC
Analyse qualitative (Quality)	Q	QI	QR	QC	QIC	QRC
Radiation (Radiation)	R	RI	RR	RC	RIC	RRC

<i>Température</i> (Temperature)	T	TI	TR	TC	TIC	TRC
<i>Poids</i> (Weight)	W	WI	WR	WC	WIC	WR C

Quelques exemples :

- MV (Manipulated Output Value) ;
- PV=Process Variable (mesure) ;
- LSH=Level Switch High
- LSL=Level Switch Low ;
- PSH=Pressure Switch High ;
- PSL=Pressure Switch Low
- PSV=Pressure Safety Valve (soupape)

1.2.6 Schéma de quelques instruments

	Indicateur		Indicateur d'ordinateur		Contrôleur de niveau
	Dernière le panneau de configuration		Indicateur programmable		Transmetteur de pression
	Sur le panneau de commande central		Dispositif programmable affiché		Enregistreur de pression
	Sur le panneau de contrôle local		Ordinateur		Contrôleur de pression
	Dernière un panneau de commande local		Panneau de contrôle de l'unité		Indicateur de pression
	Indicateur 2		Indicateur de température		Enregistrement de la pression
	Indicateur 3		Émetteur de température		Alarme de niveau
	Indicateur 4		Enregistreur de température		Élément de flux
	Indicateur 5		Contrôleur de température		Élément de températeur
	Odomètre		Indicateur de flux		Jauge de niveau
	Manomètre		Transmetteur de débit		Analyseur Emetteur
	Débitmètre		Enregistreur de flux		Transducteur
	Thermomètre		Contrôleur de flux		Article de spécialité
	Indicateur de partage		Indicateur de niveau		Échantillonneur
	Affiché et Configurable		Indicateur de pression		Aubes de redressement
	Indicateur de partage		Transmetteur de niveau		Mètre diaphragme
			Enregistreur de niveau		Mètre rotatif

1.2.7 Panneaux et Pictogrammes

La réglementation sur le contenu des étiquettes liées aux produits et mélanges chimiques a changé, en application du nouveau règlement européen CLP (classification, labelling, packaging). Celui-ci s'aligne sur le règlement international adopté par les Nations unies (GHS). Neuf pictogrammes seront désormais utilisés en fonction des dangers représentés. Les nouvelles étiquettes remplacent les célèbres carrés orange (Fig.1.2).

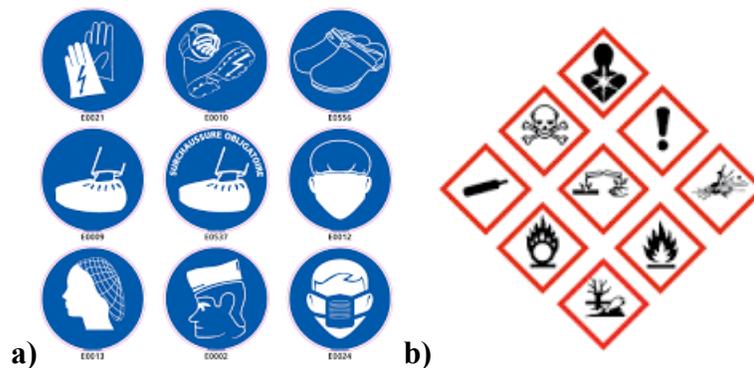


Figure 1.2 : Quelques panneaux et pictogrammes de sécurité : (a) Les EPI, (b) les pictogrammes pour les produits chimiques

1.2.8 Les 28 classes de danger définies par le règlement CLP :

- **Classes de danger physique** : explosifs, gaz inflammables, aérosols inflammables, gaz comburants, gaz sous pression, liquides inflammables, matières solides inflammables, substances et mélanges autoréactifs, liquides pyrophoriques, matières solides pyrophoriques, substances et mélanges auto-échauffants, substances et mélanges qui, au contact de l'eau, dégagent des gaz inflammables, liquides comburants, matières solides comburantes, peroxydes organiques, substances ou

mélanges corrosifs pour les métaux

- **Classes de danger pour la santé** : toxicité aigüe, corrosion cutanée/irritation cutanée, lésions oculaires graves/irritation oculaire, sensibilisation respiratoire, sensibilisation cutanée, mutagénicité sur les cellules germinales, cancérogénicité, toxicité pour la reproduction, toxicité systémique pour certains organes cibles (exposition unique), toxicité systémique pour certains organes cibles (expositions répétées), danger par aspiration..
- **Classes de danger pour l'environnement** : danger pour le milieu aquatique, danger pour la couche d'ozone.

1.3. ANALYSE

1.3.1 Analyse des accidents du travail :

L'analyse des accidents du travail et des maladies professionnelles a pour but de déterminer la régularité de leurs apparitions, l'analyse des traumatismes se fait à l'aide des méthodes suivantes :

- ✓ Méthode statique : cette méthode qui se base sur le calcul du nombre d'accidents pour une durée de temps déterminée, cette méthode utilise deux facteurs qui sont :
- Le taux de fréquence : il représente le rapport entre le nombre d'accidents (A) avec arrêt de travail pour une durée de temps déterminée (mois, jours, trimestre...) et le nombre d'heures ouvrables ayant été travaillé par tout le personnel durant la même période.

$$T_f = A \frac{10^6}{H} \quad (eq. 1)$$

- Taux de gravité : c'est le rapport du taux de fréquence est le nombre de journées perdues (P) à cause des accidents et le nombre d'heures ouvrables ayant été travaillées pour tout le personnel pour la même durée.

$$T_g = P \frac{10^3}{H} \quad (eq. 2)$$

- ✓ Méthode topographique : elle consiste à répartir sur le plan de masse de l'usine tous les points ou ont lieu des accidents afin de déterminer les zones dangereuses.
- ✓ Méthode monographique : elle consiste à étudier les conditions ou l'accident a eu lieu afin de déterminer la cause exacte des accidents.

1.3.2 Analyse des affections professionnelles :

Afin d'évaluer le niveau des affections professionnelles dans l'industrie on a recours aux indices statistiques suivants :

Intensité des affections professionnelles :

$$I = \frac{N_1}{P_1} \times 100 \quad (eq. 3)$$

N1 : Nombre de travailleurs atteints par des affections

aigues P1 : nombre de travailleurs total dans l'entreprise

Poids spécifique des affections professionnelles en fonction d'une nocivité donnée.

$$P = \frac{N_2}{P_2} \times 100 \text{ (eq.4)}$$

N2 : nombre d'ouvriers atteints d'infections professionnelles à partir d'une nocivité donnée

P2 : nombre total d'ouvriers soumis à l'action de cette nocivité

1.3.3 Fréquence de naissance des maladies professionnelles à partir d'une nocivité donnée :

$$F = \frac{N_3}{P_3} \times 100 \text{ (eq.5)}$$

N3 : nombre de maladies professionnelles ayant apparues sous l'action d'une nocivité déterminée.

P3 : nombre total d'ouvriers soumis à l'action de la nocivité en question

Gravité des affections professionnelles :

$$G = \frac{N_4}{P_4} \times 100 \text{ (eq.6)}$$

N4 : nombre de maladies professionnelles ayant entraîné une invalidité ou ayant eu une issue fatal

P4 : nombre total de maladies professionnelles dans l'entreprise

Chapitre 2

Technologies et appareils de mesures

2.1.1 But

Les appareils de mesures permettent de connaître certains points d'une fabrication. Ils donnent la possibilité d'agir sur le procédé de fabrication de manière à obtenir la qualité et la quantité de produits finis conformément à certaines spécifications dans les meilleures conditions de sécurité.

Pour cela les appareils donnent une information permettant d'effectuer des contrôles.

2.1.2 Principes de mesures

Un appareil de mesure, on dit aussi appareil de contrôle, peut être basé sur plusieurs méthodes. Ces méthodes sont :

Directes	Indirectes	D'opposition
Mesure d'une longueur avec un mètre étalon	Mesure d'une longueur par l'intermédiaire de la loi $X=vt$	Balance à double plateaux

*Une mesure par opposition peut être directe ou indirecte.

2.1.3 Fonction d'un appareil de mesure ou de contrôle :

L'appareil peut remplir une ou plusieurs fonctions qui sont :

- ✓ L'indication : l'appareil est indicateur lorsqu'il donne la mesure par l'intermédiaire d'une aiguille se déplaçant sur un cadran gradué, ou l'inverse ; il peut être à

indication continue ou discontinue.

- ✓ L'enregistrement : il donne la mesure par inscription sur papier (diagramme) continu ou discontinu.
- ✓ Intégration : il donne la somme des mesures instantanées. (ex : capteur d'électricité)
- ✓ La signalisation : ce type d'appareil donne un signal sonore, lumineux, ou autre lorsque la variable atteint une valeur critique définie préalablement.
- ✓ La régulation : la mesure est utilisée pour commander un servomécanisme pour effectuer des corrections.

2.1.4 Analyse dimensionnelle :

L'analyse dimensionnelle est une méthode mathématique utile pour la vérification d'équations, pour la recherche de la validité de formules empiriques ou vérifier des relations physiques entre elles.

<i>Grandeur</i>	<i>Symbole</i>	<i>unité</i>
<i>Surface</i>	A	m ²
<i>Volume</i>	V	m ³
<i>Vitesse</i>	V	m/S
<i>Accélération</i>	G ou gama	m/s ²
<i>Vitesse angulaire</i>	W	S-1
<i>Masse</i>	M	Kg
<i>Puissance</i>	P	Watt (Nm/s)
<i>Viscosité cinématique</i>	Mu	m ² / st= 10 ⁻⁴ m ²
<i>Viscosité dynamique</i>	Nu	Nm/s ²
<i>Débit</i>	Q	m ³ /s
<i>Force</i>	F	N

2.1.4 Instruments :

L'instrumentation est utilisée dans divers domaines et secteurs d'activités (industrie, recherche et développement, universités, etc.). Elle va par exemple permettre :

- d'automatiser ;
- de faire des tests sur des produits (exemple : crash test) ;
- d'observer des phénomènes (travaux pratiques dans l'éducation) ;
- de simuler des vieillissements (tests répétitifs) ;
- de faire des contrôles qualité (sur des chaînes de production) ;
- d'alerter ou de surveiller.

La chaîne d'instrumentation se constitue de la manière suivante :

Grandeur physique → Capteur → Conditionnement et Traitement du signal →
Exploitation.

Le capteur va transformer une grandeur physique en signal (le plus souvent électrique) exploitable. On distingue deux grandes familles de capteurs : passifs et actifs. Selon la famille, le conditionnement va être différent.

1. Après un capteur passif

Si le capteur est résistif (la grandeur physique fait évoluer une valeur de résistance), on pourra utiliser un pont de résistances. Si le capteur est réactif (la grandeur physique fait évoluer une valeur d'impédance), on pourra avoir recours à un montage potentiométrique ou un oscillateur.

2. Après un capteur actif

Il faudra généralement amplifier le signal avec un amplificateur simple ou un amplificateur d'instrumentation selon les cas.

Le capteur doit être :

Etendue de la mesure : Valeurs mesurées par le capteur.

Résolution : Plus petite variation de grandeur mesurable par le capteur.

Sensibilité : Variation du signal de sortie par rapport à la variation du signal d'entrée.

Précision : Aptitude du capteur à donner une mesure proche de la valeur vraie.

Rapidité : Temps de réaction du capteur. La rapidité est liée à la bande passante.

Linéarité : représente l'écart de sensibilité sur l'étendue de mesure

2.1.5 Grandeur physique dont la variation peut modifier la réponse du capteur :

- Température : modifications des caractéristiques électriques, mécaniques et dimensionnelles
- Pression, vibrations : déformations et contraintes pouvant altérer la réponse
- Humidité : modification des propriétés électriques (constante diélectrique ou résistivité).
Dégradation de l'isolation électrique
- Champs magnétiques : création d'induction pour les champs variables ou modifications électriques (résistivité) pour les champs statiques
- Tension d'alimentation : lorsque la grandeur de sortie du capteur dépend de celle-ci directement (amplitude ou fréquence)

2.1.6 Procédés industriels

Un procédé industriel est un procédé de nature mécanique ou chimique destiné à produire des objets ou à synthétiser des produits chimiques, en grande quantité et dans des conditions techniquement et économiquement acceptables. Ils sont notamment essentiels aux industries dites lourdes (par exemple, fabrication d'automobiles ou synthèse de l'essence).

Les procédés industriels permettent d'obtenir en grande quantité des produits qui autrement seraient relativement difficiles ou coûteux à obtenir. Ces produits peuvent alors être considérés comme des « commodités », c'est-à-dire des produits d'usage banal et disponibles en très grandes quantités. En rendant les produits fabriqués nettement moins chers, les procédés industriels permettent en effet de les consommer à grande échelle, par exemple l'acier, issu d'un procédé industriel, est lui-même utilisé pour la fabrication de machines. La fabrication d'un produit peut nécessiter l'utilisation de plusieurs procédés.

Il est fréquent que la mise en place d'un procédé industriel ait un coût élevé. La rentabilité de cet investissement est alors liée à la production en grande quantité.

En plus des produits désirés, l'utilisation des procédés industriels engendrent souvent des sous-produits qui peuvent parfois être néfastes pour l'environnement, voire la santé des êtres vivants.

2.2.1 Appareils de mesures :

1- Mesure de température :

Elle peut être mesurée selon différentes techniques :

Méthodes optiques (rayonnement spectral) • Méthodes mécaniques (dilatation d'un solide, d'un liquide ou d'un gaz) • Méthodes électriques (résistivité, fréquence de résonance d'un quartz).

- ***Echelles de température (grandeur intensive) :***

Kelvin : °K, Celsius : $T(^{\circ}\text{C})=T(^{\circ}\text{K})-273,15$,

Fahrenheit : $T(^{\circ}\text{F})=9/5 T(^{\circ}\text{C})+32$

Pour mesurer la température on utilise : Les thermocouples, les capteurs à résistance métallique, les thermistances etc. (Fig.2.1).

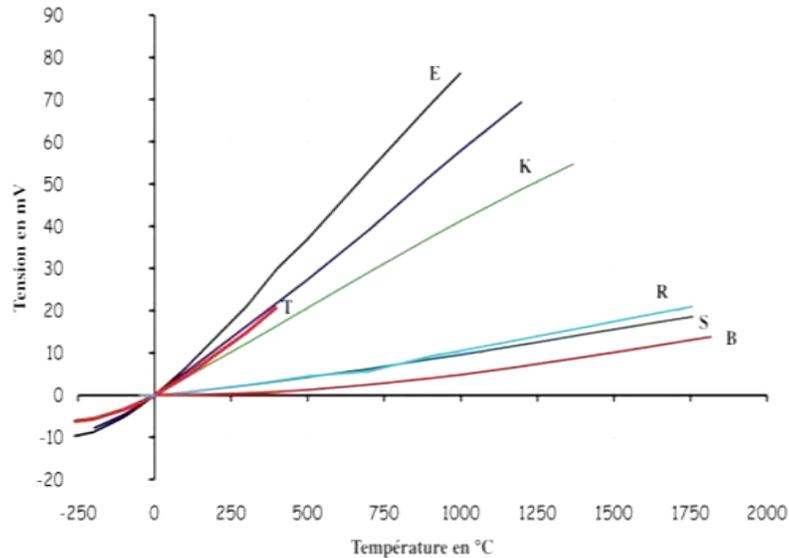


Figure 2.1 : Mesure de température

2- Mesure de la pression :

Grandeur dérivée du SI : Pression = Force/Surface cette grandeur est mesurée dans :- des circuits hydrauliques – des circuits pneumatiques - contrôle de mise sous pression de récipients - contrôle de distribution de gaz ou de fluides... Elle utilise différents types d'appareils comme : Pressostats (Dispositif détectant le dépassement d'une valeur prédéterminée, de la pression d'un fluide), manomètres, baromètres, capteurs de pression à membrane (le corps d'épreuve d'un capteur de pression est l'élément assurant la transformation de la pression en déplacement, déformation ou force), capteurs de pression différentielle, capteurs de pression piézo-résistifs, capteurs de pression hydraulique, tensiomètres...

- ***Les différentes unités de la pression :***

$$1\text{bar} = 10^5\text{Pa} = 10,194\text{m d'eau} = 751,9 \text{ mmHg} = 14,5 \text{ psi} = 1,02 \text{ Kgf/cm}^2$$

3- Mesure de vitesse, débit et niveau de fluides :

Le choix d'un capteur va dépendre de la nature de l'écoulement :

Nombre de Reynolds Re (permet de caractériser la nature de l'écoulement) :

$$Re = UD/\nu, U = Q/S \text{ (vitesse * diamètre/viscosité cinématique)}$$

Pour un tuyau, l'écoulement (monophasique) est turbulent si $Re > 2\,200$

- Tube de Pitot : utilisé en aéronautique et en sport automobile

$$\text{La vitesse égale à } U = v = (2(P_2 - P_1) / \text{masse volumique})^{0.5}$$

$$\text{Pour un fluide gazeux : } PV = nRT$$

$$\text{Donc : la masse volumique} = PM/RT$$

4- Mesure de niveau :

Il existe différents type d'appareils :

Capteurs de niveau à palettes, Capteurs de niveau à lames vibrantes, Capteurs de niveau capacitifs, Capteurs de niveau à ultrason

La technologie de mesure dépend de :

- La nature du fluide
- La vitesse du fluide
- Du régime d'écoulement
- La viscosité

On a des appareils comme :

Les rotamètres ou débitmètres à billes (Ils permettent une mesure simple visuelle

d'un débit gazeux, liquide ou vapeur sur une gamme de 10^{-4} à 200 m³/h).

Le débitmètre à flotteur (Equilibre du flotteur sous l'action de la force de poussée d'Archimède, de la traînée et de son poids).

Le débitmètre à turbine, Le débitmètre à ultrasons, Le débitmètre à effet Doppler, Le débitmètre à pression différentielle, Les capteurs à membrane : Capteurs potentiométriques, Capteurs à jauge extensométrique, Capteurs capacitifs

Chapitre 3

Sécurité des installations

3.1.1 Introduction :

Une installation ou système est un ensemble de composants reliés entre eux dans le même lieu pour un but défini, il y a les systèmes en série, les systèmes en parallèles, systèmes mixtes et les systèmes complexes.

3.1.2 Mesures administratives :

Font références au texte législatif et réglementaire obligatoire, en vue d'éviter les accidents ou de les diminuer de façon significative (en termes de dégâts matériels et humains).

L'organisation internationale du travail (OIT) publie des documents intéressants dans le domaine de prévention des risques industriels.

3.1.3 Mesures techniques :

Il existe une définition pertinente donnée selon la directive du 22 mai 2001, on entend par mesures techniques toute technologie, dispositif ou composant qui, dans le cadre normal de son fonctionnement, est destiné à prévenir ou à arrêter, les actes non autorisés prévu par la loi.

3.1.4 La sureté de fonctionnement : FDS

La sureté de fonctionnement traduit la confiance qu'on peut accorder à un système, elle est considérée comme étant la science des pannes, elle se base sur la FMDS.

Fiabilité, maintenance, disponibilité, sécurité.

3.1.5 Sécurité dans une installation :

Dans l'industrie il y a différents types de sécurités : mécanique, chimique, électrique...etc.

Nous allons prendre l'exemple de l'installation chimique.

Sécurité dans une installation chimique

Dans les maladies, on constate différents types de schémas :

- Le schéma du processus accidentel
- Le schéma de processus chronique
- Les systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS)

3.1.6 Matériel et systèmes instrumentés de sécurité :

1. Boucle TOR (Tout ou Rien) : capteurs (fin de course, position, température, pression, débit, niveau, feu et gaz, fuite HC liquides) Automates Programmables de Sécurité. Actionneurs (vannes TOR, électrovannes, ...).
2. Systèmes d'arrêt d'urgence
3. (ESD) : Emergency depressurization system
4. (EDP) : Emergency depressurization process.
5. HIPS : High Integrity Protection System.

3.1.7 Performance d'un système instrumenté de sécurité :

(Exemple d'un SIS dans le TD)

3.2.1 Maîtrise de l'environnement en milieu industriel :

Objectif de l'entreprise : mise en place de l'ISO 14001, implication du personnel.

➤ **Protection de l'air :**

Principaux polluants : particules, CO, CO₂, SO₂, NO_x, C.O.V. (vapeurs d'hydrocarbures, de solvants), C.F.C., ... qui sont à l'origine d'effet de serre, pluies acides ...

Pour la protection de l'environnement il faut se référer à la législation (normes)

➤ **Protection de l'eau, des sous-sols :**

Pour lutter contre ce phénomène plusieurs moyens sont utilisés comme : installations de traitements des eaux usées STEP, traitement physico-chimique, épuration biologique, les procédés de traitement des sous-sols...etc.

➤ **Élimination des déchets :**

La réduction des quantités de déchets se fait par plusieurs techniques come : le séchage, incinération, réduction de consommation, changement de conditions opératoires, recyclages...etc.

➤ **Protection contre le bruit :**

Dans ce contexte nous avons des équipements générateurs de bruits : machines tournantes, équipements thermiques, vannes de détentes, échappements.

Ces appareils représentent des nuisances et conséquences sur l'être humain. Mesure des niveaux de bruit. Techniques de réduction du bruit et actions des exploitants.

3.2.2 Gestion et traitement des déchets industriels

Contexte législatif et réglementaire	directives européennes
traitements physiques, traitements chimiques (neutralisation, ...), traitements biologiques.	Traçabilité des déchets Coût de gestion des déchets Organisation de la gestion des déchets.

➤ **Mesures administratives :**

La DIRECTION DE LA PROTECTION DU PATRIMOINE (DPP) demande la documentation suivante afin de permettre aux services compétents de l'administration

centrale d'assurer la sécurité industrielle:

- Sécurité générale (Plan général et dessins des fondations des équipements et leur calcul, Réseaux d'égouts, Description générale du procédé)
- Equipements électriques et mécaniques (électriques, mécaniques)
- Contrôles techniques (Réservoirs ; tuyauteries, soupapes, système anti-incendie)

(Une recherche bibliographiques par un sous thème et par trinôme est demandée)

Chapitre 4

Sécurité des machines et équipements : distance de sécurité, protecteurs, autres dispositifs de sécurité (détecteurs, arrêts d'urgences,...)

4.1.1 Introduction

La sécurité des machines et des équipements constitue un point très important pour la sécurité au sein de l'entreprise ou de l'industrie, le fait d'opter pour des machines qui certifie une sécurité maximale de l'appareil lui-même se reflétera automatiquement sur la sécurité de l'installation puis sur la sécurité individuelle et vis-versa.

4.1.2 Machine :

Dans l'industrie il existe différents types de machines, on peut citer comme exemple : Pompes et compresseurs (volumétriques, axiales, radiales, semi-radiales), chaudières, turbines à vapeur, turbines à gaz, les fours, échangeurs de chaleurs, dessaleurs, moteurs (électriques, à combustion interne...).

4.1.3 Sécurité des machines :

Exemple (figure 4.1) :

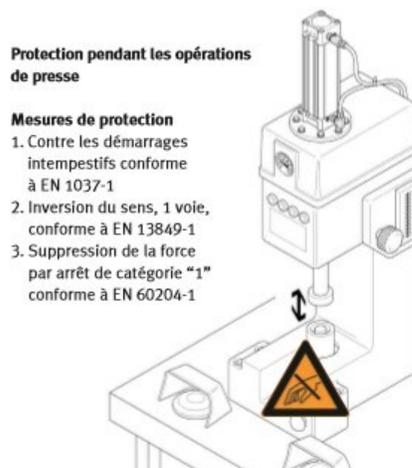


Figure 4.1 : protection pendant les opérations de presse

➤ **Plan de sécurité**

Dans un schéma tuyauterie et instrumentation, les instruments de mesures sont indiqués ainsi que leurs caractéristiques. On trouve 3 types de capteurs :

- les indicateurs
- les enregistreurs
- les éléments de contrôle

➤ **Distance de sécurité :**

(un travail de recherche demander aux étudiants en forme de devoir)

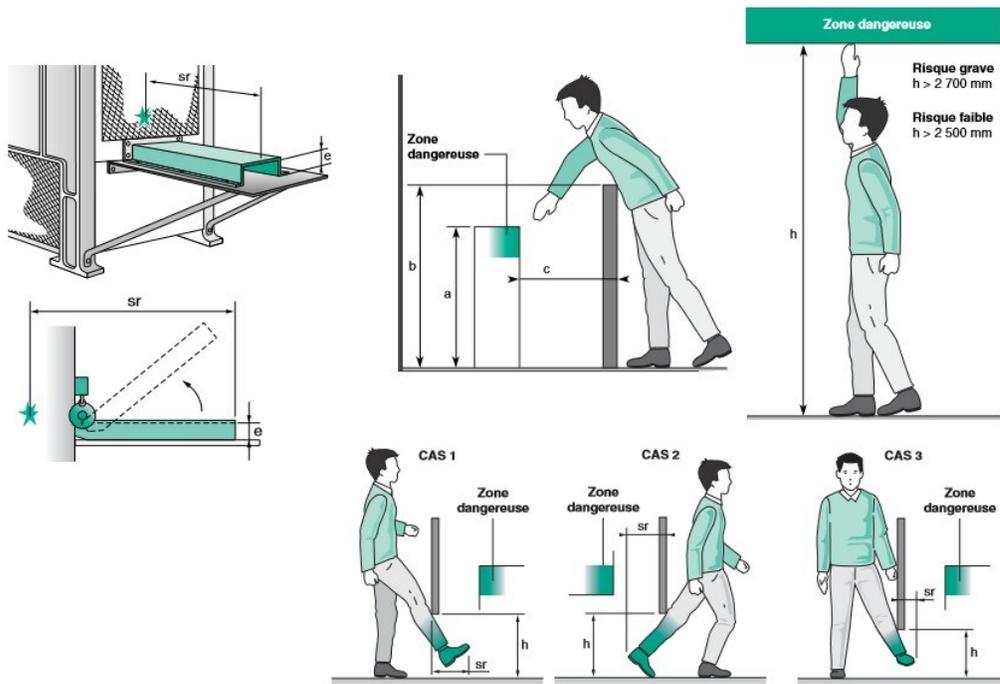


Figure 4.2 : Distance de sécurité (a)

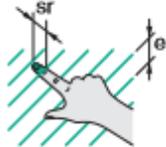
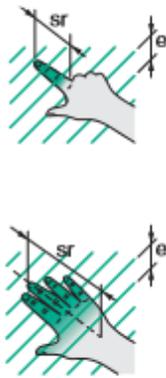
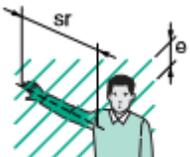
Partie du corps	Illustration	Ouverture (mm)	Distances de sécurité sr (mm)		
			Fente	Carré	Rond
Extrémité du doigt		$e \leq 4$	≥ 2	≥ 2	≥ 2
		$4 < e \leq 6$	≥ 10	≥ 5	≥ 5
		$6 < e \leq 8$		≥ 15	≥ 5
Doigt jusqu'à l'articulation à la base du doigt ou main		$6 < e \leq 8$	≥ 20		
		$8 < e \leq 10$	≥ 80	≥ 25	≥ 20
		$10 < e \leq 12$	≥ 100	≥ 80	≥ 80
		$12 < e \leq 20$	≥ 120	≥ 120	≥ 120
		$20 < e \leq 30$		≥ 120	≥ 120
		$30 < e \leq 40$		≥ 200	≥ 120
Bras jusqu'à l'articulation de l'épaule		$20 < e \leq 30$	$\geq 850^*$		
		$30 < e \leq 40$	≥ 850		
		$40 < e \leq 120$	≥ 850	≥ 850	≥ 850

Figure 4.2 : Distance de sécurité (b)

4.2 Protecteurs :

Nous utilisons le terme officiel normalisé de « RÉDUCTEUR » :

A- De pression :

Cet appareil réduit la pression de l'eau qui le traverse, et permet d'obtenir à sa sortie une valeur réglée et constante. Installé à l'entrée du réseau d'eau (pour un pavillon comme pour un appartement) il protège toute l'installation des problèmes dus à un excès de pression : bruits dans les canalisations, coups de bélier, éclaboussures, usures prématurées des

appareils électroménagers et des robinetteries.

Le réducteur de pression est un appareil totalement autonome.

BP : de 9 à 50 mbar.

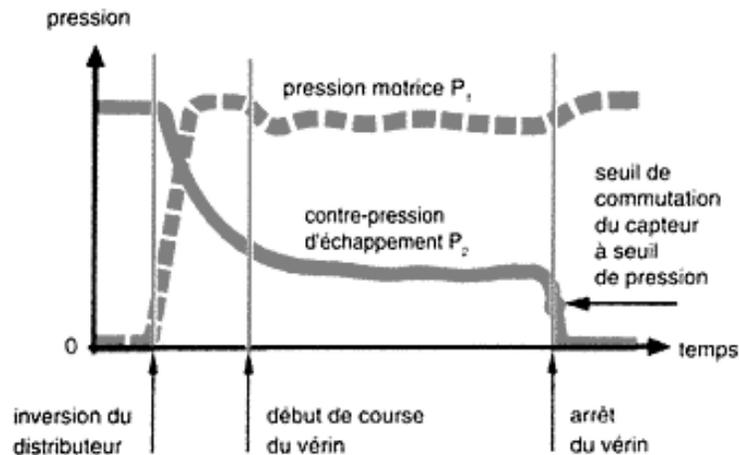
MP : 0.3 à 5 bar.

HP : > 5 bar.

Effets de la variation de pression :

- Contre-pression :

Comme son nom l'indique la contre diffusion représente une pression d'un sens inverse de la pression principale, ce phénomène physique provoque une légère déformation de la conduite qui subit cette action.



- Coup de bélier :

Phénomène de surpression (augmentation de la pression) ou une variation brusque de la vitesse du fluide ou ouverture / fermeture rapide de la vanne ou démarrage / arrêt de la pompe, ceci peut provoquer la rupture d'une tuyauterie pour éviter ce phénomène on peut :

Utiliser une vanne automatique de pompage

Installer un bypass

Installer un dispositif anti-bélier

La surpression liée au coup de bélier est donnée par la formule de Joukovski :

$$\delta P = Z_h Q \quad (eq. 7)$$

La surpression est exprimé en Pa, le débit volumique est en (m³/s), Z_h : représente l'impédance hydraulique en (kg/m⁴ s)

$$Z_h = \frac{\sqrt{\rho B_{eff}}}{A} \quad (eq. 8)$$

La masse volumique en Kg/m³, la section de la conduite en m² B_{eff} exprimé en (Pa) représente la compressibilité effective.(fig. 4.3)



Figure 4.3 : Exemple de quelques dommages causés par un coup de bélier

Un risque de contre-pression ou coup de bélier existe dans le circuit aval, il est conseillé de protéger le réducteur de pression par un clapet de non-retour placé immédiatement à sa sortie.

- Cavitation :

On appelle cavitation la formation radiale de bulles de gaz ou de vapeur dans un liquide soumis à une dépression. Si cette dépression est suffisamment élevée la pression peut

devenir inférieure à la pression de vapeur saturante et des bulles de vapeur sont susceptibles de se former.

Origine de la cavitation :

La dépression peut avoir trois origines différentes connues à ce jour :

Elle peut être liée à un écoulement de liquide à forte vitesse, par exemple par effet de venturi, ou bien au voisinage d'une pale dans une pompe,

Elle peut être liée aux variations de densité d'un liquide soumis à une onde acoustique en général des ultrasons de puissances, on parle alors d'une cavitation acoustique

Elle peut être liée à une exposition forte d'énergie lumineuse. On parle alors de cavitation optique.

Conséquence de la cavitation :

La cavitation est un phénomène à éviter absolument car il entraîne :

- Une chute brutale du rendement,
- Des vibrations violentes,
- Une érosion de la surface solide,

Le NPSH :

Le Net Positive Suction Head ou hauteur d'aspiration nette positive est un paramètre lié à la cavitation. De même que la hauteur d'élévation le débit et la puissance, il représente pour une pompe une des données les plus importantes.

On distingue le NPSH de l'installation et le NPSH de la pompe, pour un fonctionnement sans cavitation il faut que le NPSH installation > NPSH pompe

Cette condition doit être remplie sur la totalité du domaine de fonctionnement admissible de la pompe, c'est le cas lorsque le NPSH installation > 0.5 m du NPSH pompe

a- Thermique :

Les exigences relatives à l'utilisation de protecteurs et détecteurs thermiques incorporés dans les enroulements statiques, ou autres emplacements adaptés, dans les machines à induction afin de les protéger des graves dommages dus aux surcharges thermiques. Certaines normes s'appliquent aux machines construites en accord avec les limites de tension spécifiées dans la protection des paliers, collecteurs à bagues et autres organes mécaniques.

Généralement la plupart des moteurs utilisent la classe d'isolation F avec l'échauffement de classe B, ce qui correspond aux exigences industrielles les plus fréquentes.

✓ Isolation classe F

Température ambiante maximale 40 °C

Échauffement maximal admissible 105 °K

Réserve thermique + 10 °K

✓ Échauffement classe B

Température ambiante maximale 40 °C

Échauffement maximal admissible 80 °K

Réserve thermique + 10 °K

✓ Température des différentes classes d'isolation

Voir figure 4.5.

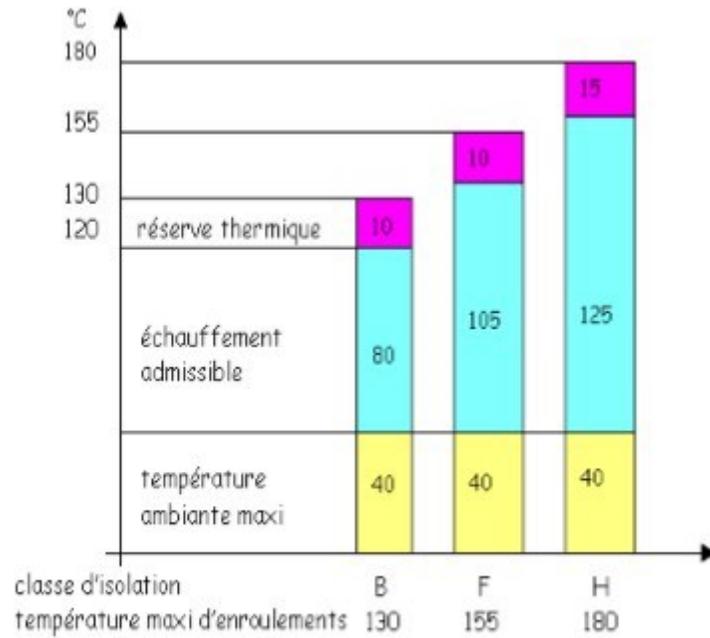


Figure 4.5 : les classes de températures

- Arrêts d'urgence

Les machines et les installations doivent être équipées d'un circuit d'arrêt d'urgence permettant de maintenir la sécurité de l'appareil (machine) ou d'empêcher un danger en cas d'urgence (Fig.4.6)

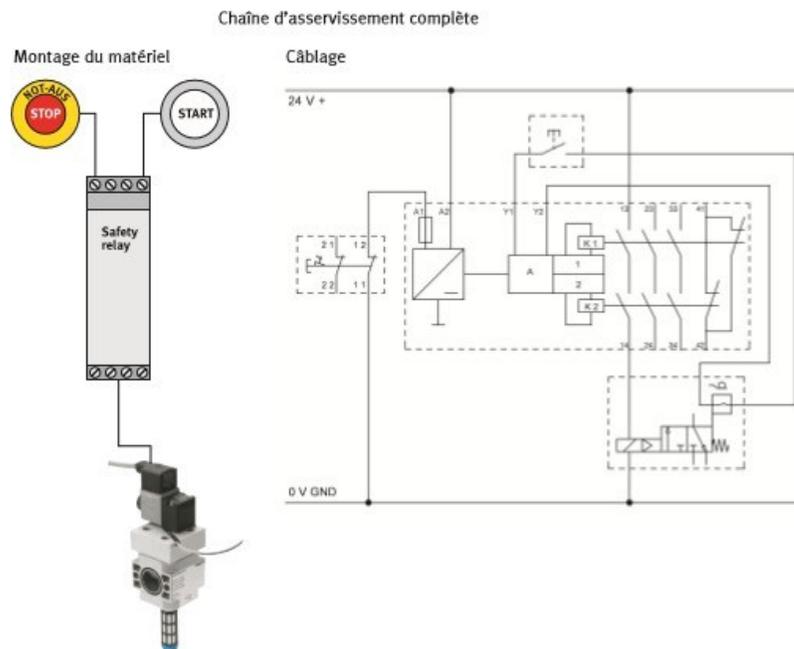


Figure 4.6 : Exemple d'un système d'arrêt d'urgence sur appareil

Chapitre 5

Sûreté de fonctionnement des machines : Circuits de commandes
automates programmables, systèmes instrumentés de sécurité

5.1.1 Définitions

La sûreté de fonctionnement :

Elle est apparue comme une nécessité au cours de la révolution industrielle. L'objectif de la sûreté de fonctionnement est d'atteindre zéro accident, zéro arrêt, zéro défaut et même zéro maintenance. Pour cela il redevrait expérimenter toutes les utilisations possibles d'un produit pendant une grande durée :

Ce qui est inconcevable dans le contexte industriel voire même infaisable !!

La sûreté de fonctionnement est un domaine d'activité qui propose des moyens pour augmenter la fiabilité et la sûreté des systèmes dans des délais et avec des couts raisonnables.

Tout système doit accomplir dans des conditions et dans un environnement donné une fonction au minimum.

Une fonction peut être définie comme l'action d'une entité ou de l'un de ses composants exprimée en termes de finalité. Il convient de distinguer les fonctions et la structure (ou encore architecture matérielle support).

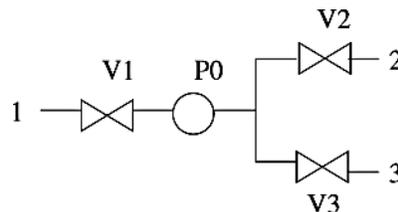
1. fonction principale : raison d'être d'un système (pour un téléphone portable, la fonction principale est la communication entre 2 entités) ;
2. fonctions secondaires : fonctions assurées en plus de la fonction principale (sms, horloge, réveil, jeux . . .) ;
3. fonctions de protection : moyens pour assurer la sécurité des biens, des personnes et de l'environnement ;
4. fonctions redondantes : plusieurs composants assurant la même fonction.



Figure 5.1 : Arbre de la sûreté de fonctionnement

➤ Exemple : (expliquer en cours sous forme d'exercice)

Identifier des fautes, des erreurs et des défaillances possibles.



Défaillance mineure (minor)	Défaillance qui nuit au bon fonctionnement sans causer de dommage notable ni présenter de risque important pour l'homme
Défaillance significative (major)	Défaillance qui nuit au bon fonctionnement d'un système en causant un dommage négligeable au système ou à son environnement sans présenter de risque

	pour l'homme
Défaillance critique (hazardous)	Défaillance qui entraîne la perte d'une (ou des) fonction(s) essentielle(s) du système et cause des dommages importants au système en ne présentant qu'un risque négligeable de mort ou de blessure
Défaillance catastrophique (catastrophic)	Défaillance qui occasionne la perte d'une (ou des) fonction(s) essentielle(s) du système en causant des dommages importants au système ou à son environnement et/ou entraîne la mort ou des dommages corporels

Les suretés de fonctionnement sont parfois appelées FDMS pour Fiabilité, Disponibilité, Maintenabilité et Sécurité (RAMSS pour Reliability, Availability, Maintainability, Safety, Security).

5.2. Méthodes d'analyse de sureté de fonctionnement :

Une analyse prévisionnelle de sureté de fonctionnement, par exemple :

- des défaillances et des pannes des composants du système,
- des événements liés à l'environnement,
- des erreurs humaines en phase d'exploitation.

Plusieurs méthodes d'analyse sont mises au point pour mieux assurer la sûreté de fonctionnement. Les principales sont :

APD : Analyse Préliminaire des Dangers,

AMDE : Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets,

MAC : Méthode de l'Arbre des Causes,

5.3 Taux de défaillance :

(un travail de calcul demander aux étudiants en forme de devoir)

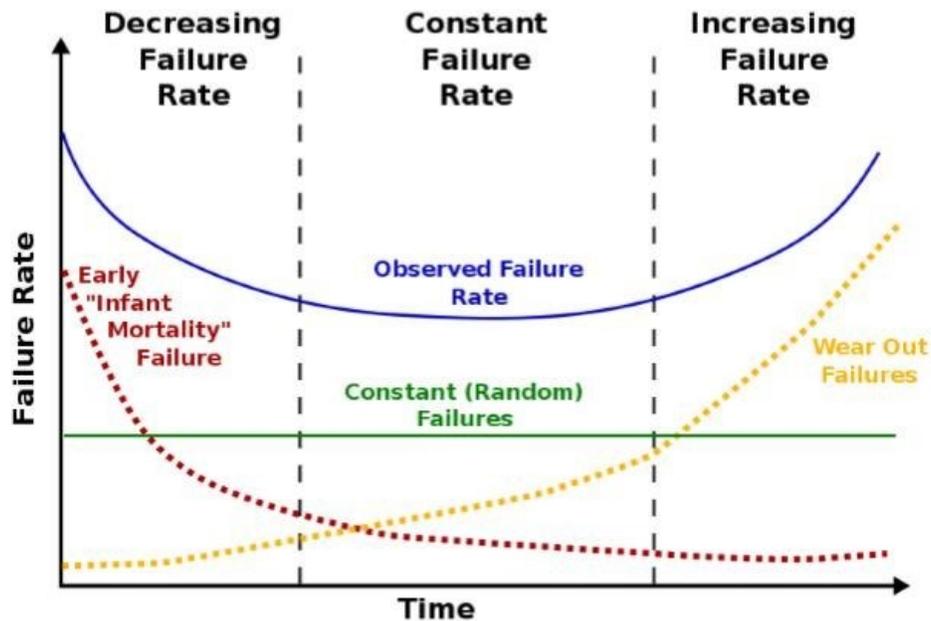


Figure 5.2 : Taux de défaillance en fonction du temps

Les différents temps moyens sont représentés dans la figure 5.3 :

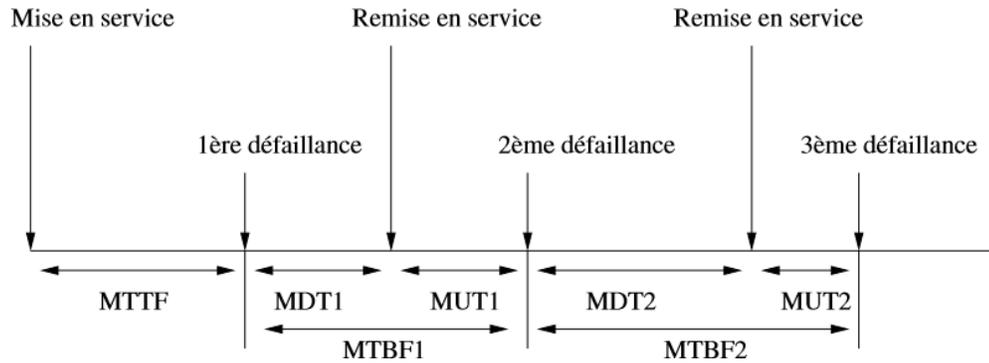


Figure 5.3 : Représentation des temps moyens dans la vie en opération

Soit Y la variable aléatoire désignant la durée de la panne du composant,

MUT (Mean Up Time) : durée moyenne de fonctionnement du système après réparation

MDT (Mean Down Time) : durée moyenne de non fonctionnement du système.

MTBF (Mean Time Between Failure) : durée moyenne entre 2 pannes.

MTTR (Mean Time To Restoration) : durée moyenne avant remise en service.

5.4. Les circuits :

- **Le circuit de commande** : est celui auquel l'opérateur a accès pour la marche et l'arrêt des moteurs. Il comprend les boutons-poussoirs, les commutateurs, les relais, temporisés ou non et les contacts auxiliaires des contacteurs.
- **Le circuit de puissance** : est celui dans lequel les moteurs sont branchés. Il comprend les sectionneurs, les contacteurs, les relais thermiques et les moteurs.

5.6 Automate programmable industriel (API) :

Un API est un appareil dédié au contrôle d'une machine ou d'un processus industriel, constitué de composants électroniques, un API est composée de trois grandes parties :

- Le processeur ;
- La mémoire ;
- Les interfaces Entrée/sorties (TOR)

L'alimentation d'un API est élaboré à partir d'un réseau 220 VAC en courant alternatif ou d'une source 24 VDC en courant continu.

5.7 Système instrumenté de sécurité (SIS) :

C'est un système visant à mettre un procédé en position de repli de sécurité (état stable de sécurité). Un SIS se compose de trois parties :

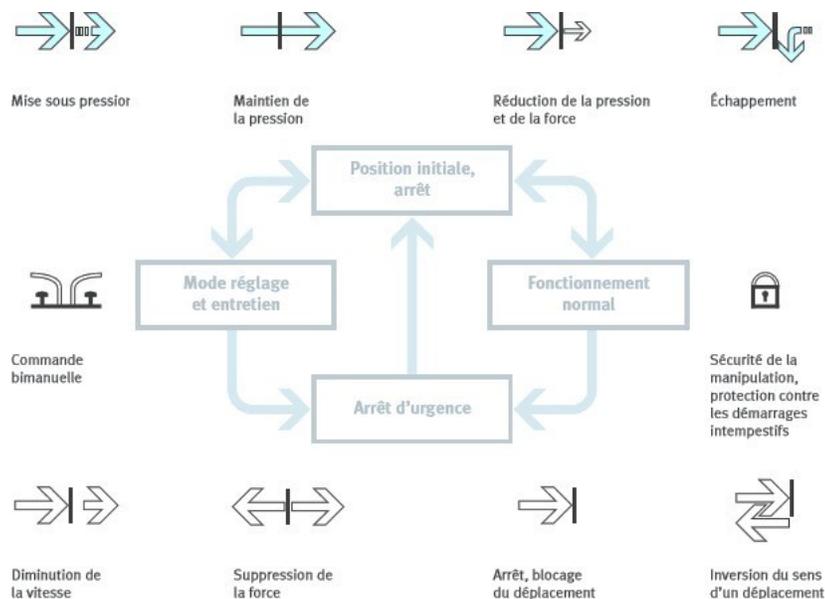
- Une partie capteur
- Une partie système de traitement logique (UTL)
- Une partie actionneur

Pour déterminer le SIL d'un SIS, on a recours à des méthodes quantitatives et qualitatives,

- Les méthodes les plus répandus sont :
- Les équations simplifiées,
- Les arbres de défaillances,
- Les approches Markoviennes,

5.8 Les modes de fonctionnement

(un exemple explicatif par la figure 5.5)



Quelques exercices d'applications

Exercice 1

1. que veut dire : sécurité des installations et des équipements industriels.
2. Donnez la signification des abréviations suivantes :

REACH/ CNAS/ CCR/ CDCIR/ GTT/ OTT/ BIT/ DPPR/ BRTICP/ CHS/ EPI/
HAZID/HAZOP/ SIS.

Exercice 2

- L'acide sulfurique, appelé jadis huile de vitriol ou vitriol fumant, est un composé chimique de formule H_2SO_4 . C'est un acide minéral dont la force ($pK_a = -3,0$) est seulement dépassé par quelques super acides.
- Le nitrate de potassium est un corps chimique ionique anhydre composé d'anions nitrates et de cations potassium, de formule brute KNO_3 . Le nitrate de potassium est une matière comburante, qui active toute combustion.
- Le benzène est un composé organique de formule brute C_6H_6 déterminée aisément par l'analyse de sa combustion, L'intoxication chronique par le benzène et ses homologues (toluène, xylène et styrène essentiellement), appelée benzolisme ou benzénisme, génotoxique et d'autres risques.

Exercice 3

1. Quelles sont les fonctions d'un appareil de mesure ou de contrôle
2. Définissez l'erreur systématique lors de l'utilisation d'un appareil de mesure
3. Donnez la construction de base d'un appareil de mesure
4. Donnez la fonction des appareils suivants : manomètre à bourdon, manomètre à soufflet, manomètre différentiel, thermocouple, débitmètre, refractomètre, densimètre, balance,

tensiomètre, piézomètre.

5. Quelles sont les méthodes de mesures de niveau

6. Quelle est la différence entre un capteur et un appareil de mesure

Exercice 4

De l'hydrogène s'écoule dans une conduite à 15°C, un tube de Pitot relié à un manomètre différentielle à eau a été placé sur lequel on observe une dénivellation de 20 cm, la pression mesurée dans la conduite étant de 3atm.

Calculer les débits : Q_m , Q_v , Q_p , de l'hydrogène dans sa conduite, on donne $d= 0.6m$

Exercice 5

Les tests de calibration d'un tube de Pitot sont porté sur le tableau suivant :

V(m/s)	0.75	0.90	1.28	1.98	2.43
P(CMCE)	1.93	4.37	8.89	23.14	2.42

Calculez la constante K (correcteur de vitesse)

Exercice 6

De l'oxygène s'écoule dans une conduite de 60cm de diamètre interne en un point de la conduite à $t=50^\circ C$ on a déposé un manomètre qui indique une pression totale de 2 bars absolus ainsi qu'un tube de Pitot relié à un manomètre différentiel à alcool sur lequel on observe une différence de niveau de 30 cm d'alcool.

- Quelle est la vitesse de l'oxygène dans la conduite ?
- Calculer les débits massiques, volumiques, et pondéraux de l'oxygène dans la conduite.

Exercice 7

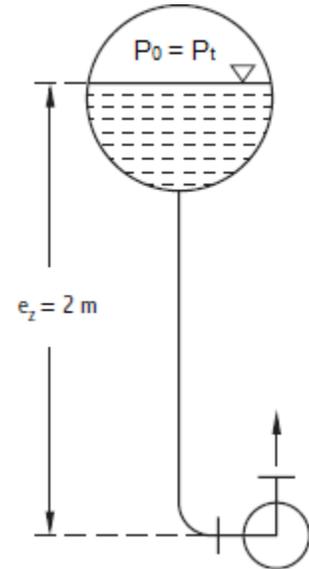
Afin de mesurer le niveau d'un liquide de densité 0.75 dans un réservoir fermé sous pression on utilise un flotteur avec câble et contrepoids le volume du flotteur est de 10 dm³, sa masse

et de 10Kg. Quelle est la masse du contrepoids si le niveau mesuré est de 10m de liquide.

Exercice 8

Soit à transférer de l'ammoniac liquide à une température de 5°C contenu dans un réservoir fermé. L'ammoniac est en état d'ébullition avec $P_0 = P_t$.

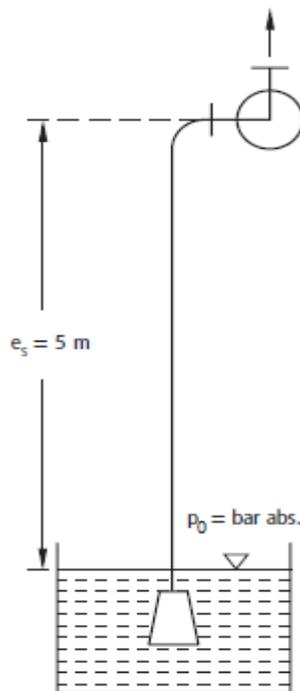
Quelle est la valeur du NPSH_{req} qu'il ne faut pas dépasser pour travailler sans risque de cavitation si la perte de charge h'_a est de 0,5 m ?



Exercice 9

Expliquer le Taux de défaillance avec schéma explicatif (termes en français ou en anglais).

Exercice 10



Soit à transférer de l'octane liquide à 20°C contenu dans un réservoir à pression atmosphérique. La hauteur géodésique d'aspiration e_s est de 5 m et la pression atmosphérique (p_0) s'exerçant sur la surface du liquide est de 1 bar abs. A 20°C la masse volumique de l'octane est de 700 kg/m^3 et sa tension de vapeur (p_t) est de 0,013 bar abs. La perte de charge h'_a dans la tuyauterie est estimée à 1 m.

- 1) Calculer le NPSH_{dis}
- 2) Dédire le NPSH_{req} maximal pour éviter le problème de cavitation.

Quelques Références qui ont été la source de ce support pédagogique

1. *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels* A. Villemeur - Ed. Eyrolles (1988)
2. *Maintenance industrielle* AFNOR (1988)
3. *Bnae RE Aéro 701.11 : Bureau de Normalisation de l'Aéronautique et de l'Espace. Guide des méthodes courantes d'analyse de la sécurité d'un système missile ou spatial.*
4. *System Safety Engineering and Management* H.E. Roland, H. Chesnut
5. *Sécurité des systèmes* C. Lievens - Cépadués Editions (1976)
6. *MIL-STD-882-B - System Safety Program Requirements*
7. *La sûreté des machines et des installations automatisées*, SADAV, CITEF, 1992
8. REASON. J, 1998, *Achieving a safe culture: theory and practice* *Work and Stress*, Vol. 12,n° 293 - 306.
9. *Dangers, risques, sécurité sanitaire et principe de précaution : les mots et leur sens*, François Grémy
10. *Références électroniques sur la Sécurité des machines.* URL :
 - <http://www.schneider-electric.fr/sites/france/fr/solutions-ts/oem/securite-machine/guide-securite.page>
 - <https://hal-ineris.ccsd.cnrs.fr/ineris-00971995> Submitted on 3 Apr 2014