**TD Etude de la structure matérielle associée à la fonction**

**« Acquisition et mesure d’accélération linéaire et de vitesse angulaire »**

**Objectif**: étudier la structure matérielle associée à la fonction « Acquisition et mesure d’accélération linéaire et de vitesse angulaire », afin d’être en mesure, ultérieurement, d’élaborer le programme permettant d’acquérir, de mesurer puis de transmettre à la passerelle, les informations d’accélération linéaire et de vitesse angulaire auxquelles la carte End Device est soumise.

**Consignes** : avant de répondre aux questions de ce TD, lire ***attentivement***, ***au moins deux fois*** dans leur intégralité, et en s’aidant du logiciel de traduction en ligne DeepL si nécessaire :

* la documentation du composant **LSM6DS3** (<https://www.st.com/resource/en/datasheet/lsm6ds3.pdf>) ;
* la note d’application AN4650 du composant **LSM6DS3** (<https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/12/98/b4/44/a5/bf/4e/c5/DM00157511.pdf/files/DM00157511.pdf/jcr:content/translations/en.DM00157511.pdf>).

1. **Localisation de la fonction objet de l’étude**

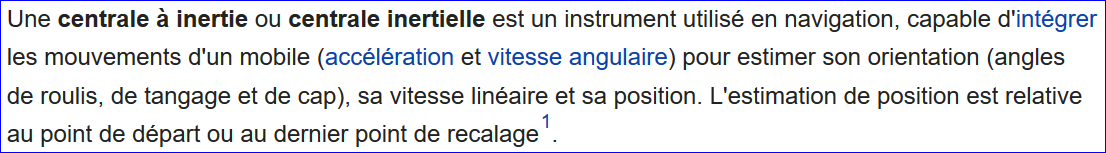


1. **Schéma structurel associé**

|  |
| --- |
|  |

1. **Présentation fonctionnelle du composant LSM6DS3**
   1. Préciser, parmi les propositions qui suivent, à quel type de composant le LSM6DS3 appartient : capteur, microcontrôleur, actionneur.
   2. Préciser les deux paramètres physiques auxquels le composant est sensible (indiquer le symbole et l’unité de la grandeur associée à chacun de ces paramètres physiques et préciser la correspondance de ces unités avec celles du Système International). Indiquer quel est le troisième paramètre physique –très secondaire- auquel le composant est sensible.
   3. Préciser la différence entre un gyroscope et un gyromètre, et justifier la raison pour laquelle on peut affirmer que, contrairement à ce que dit la documentation constructeur, le composant LSM6DS3 ne constitue pas un gyroscope, mais un gyromètre.
   4. Préciser les plages de variation possibles de chacun des deux paramètres physiques que le composant est capable de mesurer.

Ce composant peut réaliser ce qu’on appelle une centrale à inertie (ou centrale inertielle), dont une définition, extraite de Wikipedia (<https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_%C3%A0_inertie>), est donnée ci-dessous :



* 1. Indiquer, par rapport à la représentation physique du composant, où se situent les axes x, y et z, et donner leur appellation en français et en anglais, en se référant aux termes utilisés en dans le domaine de la navigation aérienne ou maritime.
  2. Indiquer par quelle opération mathématique il est possible, comme l’explique l’extrait du site Wikipedia, à partir des informations d’accélération linéaire a et de vitesse angulaire ω, d’estimer, à propos du mobile embarquant le composant LSM6DS3, « son orientation (angles de roulis, de tangage et de cap), sa vitesse linéaire et sa position ».
  3. Indiquer dans quels types d’appareils on pourra trouver ce genre de composant.

1. **Les caractéristiques du composant LSM6DS3**

***Caractéristiques électriques***

* 1. Indiquer la référence des broches d’alimentation du composant et justifier la raison pour laquelle le constructeur propose deux broches d’alimentation Vdd distinctes.
  2. Préciser les valeurs d’alimentation possibles que l’on peut appliquer sur ces broches.
  3. Indiquer dans quel cas ces deux broches seront reliées au même potentiel et dans quel cas il sera nécessaire de les relier à des potentiels distincts.

***Caractéristiques de l’interface de communication avec le microcontrôleur de commande***

* 1. Indiquer les deux interfaces de communication possibles et préciser comment s’effectue la sélection de chacune de ces deux interfaces.
  2. Préciser, si l’on valide l’interface SPI du composant, comment configurer cette dernière en interface SPI « classique » à 4 fils ou en variante à 3 fils.
  3. Préciser, si on met en œuvre l’interface I2C, combien d’adresses distinctes le composant peut présenter, comment les sélectionner et quelles sont leurs valeurs.
  4. Indiquer, pour chacune des interfaces de communication, la valeur maximale de la fréquence d’horloge.
  5. Justifier la raison pour laquelle le constructeur donne 2 références distinctes pour la broche 1.

Le constructeur indique, page 18/102, que le composant peut être configuré selon 2 modes de fonctionnement (Mode 1 et Mode 2) différents. Des explications additionnelles sur le mode 2 sont par ailleurs données pages 70 à 79/119 de la note d’application.

* 1. Indiquer à quoi correspondent ces 2 modes de fonctionnement distincts, et proposer un schéma de câblage partiel (uniquement les signaux associés aux broches 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 12, 13 et 14 du composant LSM6DS3) :
* d’un LSM6DS3 configuré en mode 1 et piloté par l’interface SPI 4 fils d’un µC ;
* d’un LSM6DS3 configuré en mode 1 et piloté par l’interface I2C d’un µC ;
* d’un LSM6DS3 configuré en mode 2 et associé à 4 composants équipés d’une interface I2C.

***Caractéristiques de transfert Na = f(a) et Nω = f(ω)***

* 1. Donner la signification de l’abréviation anglo-saxonne FS, et préciser à quoi les abréviations LA\_FS et G\_FS proposées Table 3, page 20/102, font référence. Proposer une traduction française à ces abréviations.
  2. Relever dans la documentation, la référence des registres destinés au stockage des nombres Nax, Nay, Naz, Nωx, Nωy et Nωz significatifs des valeurs de ax, ay, az,ωx, ωy et ωzet indiquer sur combien de bits ces 6 nombres sont codés. En déduire le nombre de valeurs distinctes que peuvent prendre ces 6 nombres Nax, Nay, Naz, Nωx, Nωx et Nωx.
  3. Proposer la traduction française des abréviations LA\_So et G\_So proposées Table 3, page 20/102, et en donner une définition.
  4. Déduire, en considérant les valeurs numériques des grandeurs LA\_So et G\_So indiquées Table 3, page 20/102, le nombre de valeurs distinctes de Na et de Nω possibles. Comparer ce résultat par rapport à celui exprimé en réponse à la question 4.11 et conclure.
  5. Indiquer alors, en décimal, entre quelles valeurs min et max les nombres Na et Nω peuvent varier.
  6. Préciser à quoi correspondent les grandeurs LA\_TY\_Off et G\_TY\_Off mentionnées Table 3, page 20/102.
  7. Indiquer ce que signifie l’abréviation ODR, et en déduire à quoi correspondent les grandeurs LA\_ODR et G\_ODR mentionnées Table 3, page 21/102.

Le composant LSM6DS3 est un composant relativement complexe. Sa documentation s’avère insuffisante pour comprendre toutes les fonctionnalités qu’il intègre.

Heureusement, le constructeur propose une note d’application expliquant en détails le fonctionnement interne du composant, afin de permettre aux techniciens supérieurs et aux ingénieurs d’être en mesure de le mettre en œuvre de façon pertinente.

Nous nous intéressons dans ce qui suit à cette note d’application AN4650.

1. **La programmation du composant LIS3MDL**

***Les différents modes de fonctionnement du composant LSM6DS3***

Le constructeur indique, page 20/119, que le composant peut être validé partiellement (validation de l’accéléromètre seul ou du gyromètre seul) ou totalement (validation de l’accéléromètre et du gyromètre).

Il précise également que l’accéléromètre peut être configuré selon 4 modes de fonctionnement distincts et le gyromètre selon 5 modes de fonctionnement distincts.

* 1. Préciser le nom du registre ainsi que la référence et la valeur des bits permettant d’invalider l’accéléromètre. Même question pour invalider le gyromètre.
  2. Préciser le nom des différents modes de fonctionnement associés à l’accéléromètre et au gyromètre, et indiquer le nom du registre ainsi que la référence des bits permettant la sélection de ces différents modes de fonctionnement.
  3. Expliquer la différence entre ces différents modes de fonctionnement.

***Le traitement de signal au sein du composant LSM6DS3***

Le constructeur décrit la structure interne du composant LSM6DS3, depuis le paramètre physique d’entrée (accélération linéaire a et vitesse angulaire ω) jusqu’aux registres de sortie OUT\_XL et OUT\_G (paragraphes 3.8 et 3.9, pages 25 à 35/119).

Le traitement de l’accélération linéaire a (paragraphe 3.8, pages 25 à 30/119)

Le constructeur propose le synoptique de traitement de signal lié à l’accéléromètre suivant :



L’entrée de ce synoptique correspond au signal électrique significatif de l’accélération linéaire ax, ay ou az à laquelle le composant LSM6DS3 est soumis, et la sortie à la paire de registres (OUTX\_L\_XL,OUTX\_H\_XL),(OUTY\_L\_XL,OUTY\_H\_XL) ou(OUTZ\_L\_XL,OUTZ\_H\_XL).

Le traitement de signal à l’intérieur du composant est numérique, c’est pourquoi l’étage d’entrée est constitué d’un filtre anti-repliement, d’un échantillonneur-bloqueur et d’un convertisseur analogique-numérique (l’échantillonneur-bloqueur, non représenté ici, étant supposé intégré au convertisseur).

Ensuite, le signal est donc numérique, et traité à l’aide d’un certain nombre de filtres, permanent pour l’un d’entre eux (LPF1), et optionnels pour les autres (HP, SLOPE et LPF2), la sélection de ces derniers s’effectuant à l’aide de deux multiplexeurs logiciels représentés ici par des trapèzes.

Les caractéristiques des filtres (essentiellement la fréquence de coupure) sont programmables.

On ne s’intéressera pas dans ce chapitre, aux blocs fonctionnels représentés en bleu.

* 1. Préciser si le filtre analogique passe-bas d’entrée est implanté systématiquement, quel que soit le mode de fonctionnement de l’accéléromètre, ou bien dans certaines conditions seulement. En déduire la fonction première de ce filtre.
  2. Rappeler la fonction d’un filtre anti-repliement au sein d’une chaine de traitement numérique de signal, ainsi que la relation d’inégalité liant les grandeurs Fe (fréquence d’échantillonnage) et Fc (fréquence de coupure du filtre).
  3. Préciser la relation entre la fréquence d’échantillonnage et la grandeur ODR, et vérifier la cohérence des deux premières colonnes de la table 8, page 25/119.
  4. Indiquer le nom des registres ainsi que la référence des bits permettant de choisir la fréquence de coupure Fc du filtre passe-bas anti-repliement.
  5. Indiquer le nom du registre ainsi que la référence des bits permettant de sélectionner la fréquence de coupure du filtre numérique passe-bas LPF1.
  6. Indiquer à quoi correspond la grandeur « Total BW [Hz] » de la colonne de droite de la table 10, page 27/119, et justifier les valeurs indiquées.
  7. Indiquer le nom des registres ainsi que la référence et la valeur des bits permettant de mettre en œuvre :

1. aucun filtre optionnel,
2. le filtre numérique passe-haut,
3. le filtre numérique « SLOPE »,
4. le filtre numérique passe-bas LPF2.
   1. Préciser, parmi ces filtres, ceux dont la fréquence de coupure est programmable et indiquer dans ce cas, le nom du registre ainsi que la référence des bits permettant de procéder à la sélection de la fréquence de coupure.

On se propose pour terminer, de caractériser le filtre « SLOPE » (page 30/119), dont la présence sera justifiée ultérieurement.

* 1. Ecrire l’équation de récurrence du filtre sous sa forme canonique (en remplaçant les échantillons « Slope » et « acc » par respectivement « s » et « e »), et donner l’appellation du filtre ainsi constitué.

Le traitement de la vitesse angulaire ω (paragraphe 3.9, pages 31 et 32/119)

Le constructeur propose le synoptique de traitement de signal lié au gyromètre suivant :



L’entrée de ce synoptique correspond au signal électrique significatif de la vitesse angulaire ωx, ωy ou ωz à laquelle le composant LSM6DS3 est soumis, et la sortie à la paire de registres (OUTX\_L\_G,OUTX\_H\_G),(OUTY\_L\_G,OUTY\_H\_G) ou(OUTZ\_L\_G,OUTZ\_H\_G).

* 1. En se basant sur les explications données précédemment, proposer une description du traitement de signal effectué au sein du gyromètre, et indiquer les bits et les registres auxquels il faudra accéder pour le mettre en œuvre.

On retiendra de l’étude de la structure interne du capteur LSM6DS3, que les caractéristiques des différents filtres (type de filtre et fréquence de coupure) seront ajustées de façon empirique et expérimentale, en fonction de l’application à réaliser (pour prendre un exemple simple, on imagine aisément que les caractéristiques des filtres de ce capteur seront programmées de façon bien différente, selon qu’il est intégré dans le casque de réalité virtuelle d’un joueur qui se bat contre des créatures virtuelles extrêmement agressives ou bien dans celui d’un interne en chirurgie effectuant une opération du cœur virtuelle dans le cadre de sa formation).

***La lecture des valeurs de Na et Nω significatives des grandeurs physiques a et ω***

Le paragraphe 4, pages 36 à 44/119, décrit les différentes manières d’accéder par programme, aux valeurs de Nax, Nay, Naz, Nωx, Nωy et Nωz significatives respectivement des grandeurs physiques ax, ay, az,ωx, ωy et ωz.

* 1. Préciser les 2 méthodes permettant de savoir à quel instant une nouvelle valeur de Nax, de Nay, de Naz, de Nωx, de Nωy et/ou de Nωz est disponible, et indiquer alors, pour chacun des deux cas, les actions logicielles à effectuer pour récupérer cette ou ces valeur(s).
  2. Expliquer à quoi correspondent les formats « Little-Endian » et « Big-Endian » et indiquer le bit et le registre auquel il faut accéder pour sélectionner le format dans lequel on souhaite mémoriser les valeurs de N dans les registres de sortie. Vérifier alors la pertinence des valeurs indiquées tables 19 et 20, page 39/119.
  3. Indiquer le mécanisme permettant de lire successivement les valeurs de :
* Nωx, Nωy puis Nωz,
* Nax, Nay puis Naz,
* Nωx, Nωy, Nωz, Nax, Nay, puis Naz,

sans avoir à mentionner l’adresse de chacun des registres OUT\_XL et/ou OUT\_G à l’intérieur desquels ces valeurs de N sont mémorisées. Préciser les bits ainsi que le registre auquel il faut accéder pour mettre en œuvre ce mécanisme.

* 1. Expliquer le mécanisme prévu par le constructeur permettant de déclencher la mise à jour des registres de sortie du gyromètre OUT\_G sur un évènement externe que l’on précisera. Indiquer les bits ainsi que le registre auquel il faut accéder pour mettre en œuvre ce mécanisme.
  2. Expliquer comment il est possible de modifier de façon logicielle, l’orientation des axes de référence du gyromètre (roulis, tangage et lacet), par rapport à celle définie par défaut et précisée à la question 3.5. Indiquer alors les bits ainsi que le registre auquel il faut accéder pour modifier l’orientation des axes.

***La capacité du LSM6DS3 à élaborer des requêtes d’interruption***

Nous avons vu à la question 5.14, que le composant pouvait être configuré (logiciellement) et câblé (matériellement) de façon à élaborer auprès du µC qui le pilote, une requête d’interruption à chaque fois qu’une nouvelle valeur de mesure d’accélération linéaire a ou de vitesse angulaire ω est disponible.

En réalité, le composant peut élaborer de nombreuses requêtes d’interruption supplémentaires, que nous nous proposons de lister dans ce paragraphe.

Les informations à prendre en compte pour la suite de ce TD sont données paragraphe 5 de la note d’application, aux pages 45 à 61/119.

On rappelle ci-dessous la liste des 9 modes de fonctionnement (page 45/119) auxquels peuvent être associés la génération d’une requête d’interruption :

* Free-fall ;
* Wake-up ;
* 6D/4D orientation detection ;
* Single-tap and double-tap sensing ;
* Activity/Inactivity detection ;
* Pedometer functions ;
* Significant motion ;
* Tilt ;
* Timestamp.
  1. Préciser la référence des registres dédiés à la configuration des différentes requêtes d’interruption que le composant LSM6DS3 est capable d’élaborer.

Afin de ne pas alourdir inconsidérément ce TD, on se limitera dans ce qui suit, à décrire chacun des modes 9 modes de fonctionnement, en expliquant les évènements conduisant à l’élaboration d’une requête d’interruption, ainsi que le principe mis en œuvre pour détecter ces évènements.

* 1. Expliquer à quoi correspond la situation « Free-fall », ainsi que le principe mis en œuvre permettant de la détecter.
  2. Expliquer à quoi correspond la situation « Wake-up », ainsi que le principe de fonctionnement permettant de la détecter.
  3. Expliquer à quoi correspond la situation « 6D/4D orientation detection », ainsi que le principe de fonctionnement permettant de la détecter.
  4. Expliquer à quoi correspondent les situations « Single-tap and double-tap sensing », ainsi que le principe de fonctionnement permettant de les détecter.
  5. Expliquer à quoi correspondent les situations « Activity/Inactivity detection », ainsi que le principe de fonctionnement permettant de les détecter.
  6. Expliquer à quoi correspond l’application « Pedometer functions », ainsi que le principe de fonctionnement permettant de la mettre en œuvre.
  7. Expliquer à quoi correspond l’application « Significant motion », ainsi que le principe de fonctionnement permettant de la mettre en œuvre.
  8. Expliquer à quoi correspond l’application « Tilt », ainsi que le principe de fonctionnement permettant de la mettre en œuvre.
  9. Expliquer à quoi correspond l’application « Timestamp », ainsi que le principe de fonctionnement permettant de la mettre en œuvre.

***La lecture des valeurs de Na et Nω en temps réel ou par paquets en temps différé***

Nous avons vu que le composant LSM6DS3 avait la capacité d’informer le µC, par élaboration d’une requête d’interruption, de la mise à disposition dans les registres de sortie OUT\_XL ou OUT\_G, d’une nouvelle valeur de Nax, de Nay, de Naz, de Nωx, de Nωy ou de Nωz.

Le programme est donc interrompu … très souvent, et ce, d’autant plus souvent que la valeur d’ODR est élevée (si la valeur d’ODR programmée est maximale et égale à 6664 Hz pour l’accéléromètre et 1666 Hz pour le gyromètre, le µC sera interrompu 3\*6664 + 3\*1666 ≈ 25000 fois par seconde).

Si l’on a besoin des valeurs de Na ou Nω en temps réel, on n’a pas le choix.

Mais si l’application ne nécessite pas un fonctionnement en temps réel (ce qui sera souvent le cas), le constructeur a prévu un tampon dans lequel seront mémorisées les valeurs de Na et Nω successives, et que le µC pourra venir lire quand le programme le jugera utile. Dans ce cas, les valeurs de Na et Nω seront lues et traitées, non pas les unes après les autres, au fur et à mesure qu’elles arrivent, mais par paquets.

Ce tampon est appelé « FIFO buffer » (voir explications pages 88 à 113/119).

* 1. Indiquer ce que signifie l’abréviation FIFO et donner l’abréviation de l’autre type de tampon (complémentaire) qu’il faut connaitre. Justifier la raison pour laquelle le constructeur a intégré une FIFO plutôt que l’autre type de buffer.
  2. Expliquer de façon synthétique à quoi correspondent les modes de fonctionnement « Bypass », « FIFO », « Continuous », « Continuous-to-FIFO » et « Bypass-to-Continuous » auxquels le constructeur fait référence.

1. **Le câblage du composant LSM6DS3 sur la carte End Device (schéma page 2 sur 9)**
   1. Justifier le câblage des broches d’alimentation Vdd et Vdd\_IO du composant LSM6DS3.
   2. Préciser à l’aide de quel type d’interface du µC ESP32 le concepteur de la carte End Device a décidé de piloter le composant LSM6DS3.
   3. Justifier le câblage des broches CS et SA0.
   4. Justifier l’information « Adr I2C $6A » mentionnée sur le schéma structurel.
   5. Justifier la présence et le rôle des résistances R46 et R47.
   6. Indiquer, en considérant la présence de la résistance R45, à quel type de front (montant ou descendant) l’entrée d’interruption du µC GPIO33 (IRQ\_I2C) devra être sensible. Préciser alors la conséquence sur la configuration du composant LSM6DS3.