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

**« Acquisition et mesure de l’intensité d’un champ magnétique »**

**CORRECTION**

**Objectif**: étudier la structure matérielle associée à la fonction « Acquisition et mesure de l’intensité d’un champ magnétique », afin d’être en mesure, ultérieurement, d’élaborer le programme permettant d’acquérir, de mesurer puis de transmettre à la passerelle, l’intensité du champ d’induction magnétique au voisinage de la carte End Device.

**Consignes** : avant de répondre aux questions de ce TD, lire ***attentivement*** la documentation du composant **LIS3MDL** (<https://www.st.com/resource/en/datasheet/lis3mdl.pdf>) ***au moins deux fois*** dans son intégralité, en s’aidant du logiciel de traduction en ligne DeepL si nécessaire.

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



1. **Schéma structurel associé**

|  |
| --- |
|  |

1. **Présentation fonctionnelle du composant LIS3MDL**
   1. Préciser, parmi les propositions qui suivent, à quel type de composant le LIS3MDL appartient : capteur, microcontrôleur, actionneur.

**Ce composant est un capteur.**

* 1. Indiquer s’il s’agit d’un composant analogique ou numérique ou bien encore analogique et numérique.

**Le constructeur indique, page 1, que le composant est équipé d’une interface SPI et d’une interface I2C ; on peut donc en déduire qu’il s’agit d’un composant numérique.**

**Toutefois, si l’on considère la figure 1 page 6, on s’aperçoit que toutes les structures qui se trouvent « à gauche » du convertisseur analogique numérique noté ici ADC, sont analogiques.**

**On pourra conclure qu’il s’agit d’un composant numérique, qui intègre en son sein, des structures analogiques.**

* 1. Indiquer le paramètre physique principal auquel le composant est sensible (préciser le symbole et l’unité de la grandeur associée à ce paramètre physique).

**Ce capteur est sensible au paramètre physique champ d’induction magnétique, que l’on note , et qui s’exprime dans le système d’unités normalisé en Tesla par le symbole T.**

**Le constructeur préfère exprimer le champ d’induction magnétique en Gauss (symbole G).**

**La relation entre ces deux grandeurs est donnée par la formule 1 G = 10-4 T (ou 1 T = 104 G).**

**Le constructeur indique également figure 2, page 6, que le composant LIS3MDL est capable de mesurer la valeur du champ magnétique selon les 3 axes X, Y et Z (donc les grandeurs , et ).**

* 1. Indiquer le paramètre physique secondaire auquel le composant est sensible.

**Le composant LIS3MDL permet accessoirement de mesurer la température.**

* 1. Justifier alors la description synthétique que le constructeur propose de son composant en en-tête de sa documentation.

**Il s’agit d’un capteur magnétique dont la sortie délivre sa donnée (= la valeur du champ d’induction magnétique B) sous forme numérique, qui consomme peu (argument commercial), constituant un magnétomètre (dispositif mesurant la valeur du champ magnétique B) 3 axes (les axes X, Y et Z) « haute performance » (argument commercial).**

* 1. Indiquer la plage de variation possible du paramètre B.

**Le constructeur indique, page 1, que le composant peut être configuré avec 4 plages de variation distinctes : ±4, ±8, ±12 ou ±16 G.**

1. **Les caractéristiques du composant LIS3MDL**

***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.

**Le composant s’alimente à l’aide des deux broches Vdd et Vdd\_IO (pages 1 et 9) :**

* **Vdd constitue l’alimentation interne du composant ;**
* **Vdd\_IO constitue l’alimentation de l’étage de sortie du composant (interfaces SPI/I2C).**
  1. Préciser les valeurs d’alimentation possibles que l’on peut appliquer sur ces broches.
* **Vdd : de 1,9 V à 3,6 V ;**
* **Vdd\_IO : de 1,71 V à Vdd+0,1 V (≈ Vdd).**
  1. 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.

**Si le µC est alimenté par une source de tension comprise entre 1,9 V et 3,6 V, on reliera les deux broches d’alimentation Vdd et Vdd\_IOdu composant ensemble que l’on connectera à la tension d’alimentation du µC.**

**Par contre, si la tension d’alimentation du µC est comprise entre 1,71 V et 1,9 V, on connectera la broche Vdd à n’importe quelle valeur de tension comprise entre 1,9 V et 3,6V, et la broche Vdd\_IO à la tension d’alimentation du µC.**

***Caractéristiques des interfaces 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.

**Interface I2C ou interface SPI (version classique et complète à 4 fils et variante à 3 fils).**

**La sélection de chacun des deux modes s’effectue à partir de la broche CS (table9 page 16) : on sélectionne l’interface I2C en maintenant la broche CS en permanence au niveau haut, sinon, on sélectionne l’interface SPI en connectant cette entrée CS sur la sortie /SS de l’interface SPI du µC qui commande le composant (voir chronogrammes figure 6 page 19).**

* 1. 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.

**Le constructeur indique page 26, Table 27, que le bit 2 du registre CTRL\_REG3 (bit SIM) : si ce bit est à 0 (valeur par défaut), c’est l’interface SPI à 4 fils qui est sélectionnée, sinon, c’est l’interface SPI à 3 fils.**

* 1. 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.

**L’adresse I2C du composant est 00111x0 où x correspond au niveau logique de la tension appliquée sur la broche SDO/SA1 (page 17). Le composant comporte donc 2 adresses distinctes selon le niveau logique de la tension appliquée sur la broche SDO/SA1 : si cette dernière est connectée à la masse, l’adresse est égale à 0011100, soit 0x1C, et si elle est connectée au potentiel Vdd\_IO, son adresse sera égale à 0011110, soit 0x1E.**

* 1. Indiquer, pour chacune des interfaces de communication, la valeur maximale de la fréquence d’horloge.

**fSPCmax = 10 MHz (Table 6 page 10) pour ce qui concerne l’interface SPI, et fSCLmax = 100 kHz en mode « normal » et fSCLmax = 400 kHz en mode « fast » (Table 7 page 11) pour ce qui concerne l’interface I2C.**

* 1. Justifier la raison pour laquelle le constructeur donne 2 références distinctes pour les broches 1 et 9, et 3 références distinctes pour la broche 11.

**Les références multiples sont liées au fait que ces broches remplissent des fonctions différentes, selon que le composant est configuré pour fonctionner avec une interface SPI ou une interface I2C :**

* **la broche 1 (SCL/SPC) correspond à l’entrée d’horloge, et porte la référence SCL pour une interface I2C, et SPC pour une interface SPI (le constructeur, d’ailleurs, aurait été mieux inspiré de désigner cette broche par SCK qui est l’appellation normalisée du signal d’horloge d’une interface SPI, alors que SCP est purement « propriétaire ») ;**
* **la broche 9 (SDO/SA1) correspond à la broche de sortie SDO de l’interface SPI (connectée sur la broche d’entrée MISO du µC) ou à la broche d’entrée SA1 permettant de configurer l’adresse du composant (0x1C ou 0x1E) lorsque ce dernier est configuré en mode I2C.**
* **la broche 11 (SDA/SDI/SDO) correspond en mode SPI 4 fils, à la broche d’entrée SDI connectée sur la broche de sortie MOSI de l’interface SPI du µC qui pilote le composant, et correspond en mode I2C à la broche d’entrée ou de sortie SDA connectée à la même broche de sortie ou d’entrée SDA de l’interface I2C du µC qui pilote le composant.**

**Remarque : nous n’envisageons pas le mode SPI à 3 fils qui ne présente aucun intérêt.**

***Caractéristique de transfert N = f(B)***

* 1. Donner la signification de l’abréviation anglo-saxonne FS proposée Table 3, page 8, et donner une traduction en français. Préciser à quoi cette abréviation fait référence dans ce cas.

**FS signifie « Full Scale » (voir page 1, rubrique « Features »), que l’on traduit mot à mot en français par « Pleine Echelle ».**

**Dans notre cas, FS désigne la plage de variation ΔG mesurable (8G, 16G, 24G ou 32G).**

* 1. Indiquer sur combien de bits la valeur numérique N de l’induction magnétique B transmise au µC est codée. En déduire le nombre de valeurs distinctes que peut prendre N.

**Le nombre N significatif de la valeur de l’induction magnétique B mesurée est codé sur 16 bits (page 1, rubrique « Features »). N peut donc prendre 216 = 65536 valeurs distinctes.**

* 1. Proposer la traduction française de la grandeur « Sensitivity » proposée Table 3, page 8, et en donner une définition.

**Le terme anglo-saxon « Sensitivity » correspond à la sensibilité du capteur LIS3MDL. Elle traduit la valeur du nombre N de sortie lorsque l’induction magnétique est égale à 1G.**

* 1. Déduire, en considérant les valeurs numériques de la grandeur « Sensitivity » indiquées Table 3, page 8, le nombre de valeurs distinctes de N possibles. Comparer ce résultat par rapport à celui exprimé en réponse à la question 4.10 et conclure.

**En remarquant que (à l’arrondi près), on peut en déduire que, quelle que soit la gamme de mesures sélectionnée (±4, ±8, ±12 ou ±16 G), le nombre N pourra prendre 54736 valeurs distinctes. Ce nombre est inférieur à la valeur 65536 calculée à la question 4.9, mais il nécessite néanmoins 16 bits pour être codé.**

**On pourra conclure que le nombre N ne prendra pas les 65536 valeurs qu’il lui est possible de prendre, étant codé sur 16 bits, mais 54736 valeurs seulement.**

* 1. Indiquer alors, en décimal, entre quelles valeurs min et max le nombre N peut varier.

**N étant codé en complément à 2 (paragraphes 7.8 à 7.10, page 28), il variera donc entre**

**-27368 et +27367.**

* 1. En déduire la valeur de la résolution r du magnétomètre, correspondant à la plus petite valeur de ΔB que le magnétomètre est capable de détecter.

**Le quantum de conversion q dépend de la gamme de mesures :**

* **pour la plage de mesures ±4 G, soit r = 146 µG ;**
* **pour la plage de mesures ±8 G, soit r = 292 µG ;**
* **pour la plage de mesures ±12 G, soit r = 438 µG ;**
* **pour la plage de mesures ±16 G, soit r = 585 µG.**
  1. Comparer la valeur de r avec la valeur de bruit annoncée par le constructeur.

**Le constructeur annonce un bruit de 4,1 mG (Table 3, page 8, dans le cas d’une plage de mesures de ±12 G pour l’axe z), soit un bruit plus de 9 fois plus élevé que la résolution du dispositif de mesures. C’est énorme !**

***Les différents modes de fonctionnement du composant LIS3MDL***

Le constructeur indique, page 1 : « Continuous and single-conversion modes », que l’on pourra traduire en français par « modes continu et déclenché ».

* 1. Préciser à quoi correspondent ces deux modes de fonctionnement.

**En mode continu, le capteur effectue périodiquement des mesures, alors qu’en mode déclenché, il effectue des mesures « à la demande ».**

* 1. Préciser ce que signifie l’abréviation anglo-saxonne ODR et proposer une traduction en français appliquée au composant LIS3MDL. Indiquer et justifier l’unité proposée par le constructeur.

**ODR signifie Output Data Rate (Table 19, page 24), que l’on peut traduire dans notre cas par débit des mesures de champ d’induction magnétique ou bien encore nombre de mesures de champ d’induction magnétique par seconde.**

**Le constructeur exprime l’ODR en Hz (Tables 20 et 22, pages 24 et 25), ce qui est cohérent puisque pour un phénomène périodique, les grandeurs fréquence et débit ont même valeur.**

* 1. Indiquer avec quelle périodicité il est possible de procéder à une mesure suivie d’une lecture de la valeur du champ d’induction magnétique B.

**On peut sélectionner 12 valeurs de débits distinctes (Tables 20 et 22, pages 24 et 25) : 0.625, 1.25, 2,5, 5, 10, 20, 40, 80, 155, 300, 560 et 1000 mesures par seconde.**

* 1. Préciser si cette périodicité est liée ou non à la fréquence du signal d’horloge SCL ou SPC.

**Cette périodicité est indépendante de la fréquence d’horloge : on peut, pour un débit donné, décider de procéder plus ou moins rapidement à la lecture du résultat de mesure, indépendamment de la durée (= période) qui sépare deux mesures successives. Evidemment, il faut quand même que la période d’horloge soit suffisamment rapide pour récupérer la totalité des données pendant la durée séparant deux mesures successives.**

Le constructeur annonce, page 1 : « The device may be configured to generate interrupt signals for magnetic field detection ».

* 1. Indiquer par quel moyen le composant élabore un signal d’interruption et comment se dernier se matérialise.

**Tout signal d’interruption est généré par une broche de sortie dite « d’interruption » : il s’agit de la broche 7 (INT) du composant (Table 2, page 7).**

**Le constructeur laisse la possibilité de configurer le type de signal délivré par la broche INT, à l’instant où le composant élabore une requête d’interruption : un front montant ou bien un front descendant (Tables 36 et 37 page 29).**

* 1. Lister les différentes causes d’interruption possibles.

**Chaque axe x, y ou z a la possibilité d’élaborer une requête d’interruption, dès que la valeur du champ d’induction magnétique mesuré devient soit supérieure à une valeur maximale et positive préprogrammée, soit inférieure à une valeur minimale négative préprogrammée (Table 39, page 29).**

1. **La programmation du composant LIS3MDL**

On constate, Table 16, page 23, que le composant LIS3MDL comporte 19 registres internes.

* 1. Donner la référence des registres contenant les résultats de mesures et justifier leur nombre.

**On dénombre 8 registres dédiés au stockage des mesures :**

* **OUT\_X\_L et OUT\_X\_H contenant le résultat de mesure Nx ;**
* **OUT\_Y\_L et OUT\_Y\_H contenant le résultat de mesure Ny ;**
* **OUT\_Z\_L et OUT\_Z\_H contenant le résultat de mesure Nz ;**
* **TEMP\_OUT\_L et TEMP\_OUT\_H contenant le résultat de mesure de température T.**
  1. Donner la référence des registres de commande.

**On dénombre 5 registres de commande : CTRL\_REG1 à CTRL\_REG5.**

* 1. Donner la référence du registre d’état.

**Le registre d’état porte la référence STATUS\_REG.**

* 1. Donner la référence des registres associés au fonctionnement sous régime d’interruption.

**Les 4 registres INT\_CFG, INT\_SRC, INT\_THS\_L et INT\_THS\_H permettent de définir les paramètres de fonctionnement sous régime d’interruption.**

* 1. Préciser l’action à effectuer, par programme, pour que le composant effectue en permanence une mesure toutes les 100 ms.

**Il faut forcer les bits MD0 et MD1 du registre CTRL\_REG3 à 0 (Tables 27 et 28, page 26) pour sélectionner le mode de fonctionnement continu, et forcer les bits D0 à D2 du registre CTRL\_REG1 de telle façon que D0=0, D1=0 et D2=1 (Tables 19 et 22, pages 24 et 25) afin de sélectionner une valeur d’ODR de 10 Hz, permettant d’effectuer 10 mesures par seconde, soit 1 mesure toutes les 100 ms.**

* 1. Préciser l’action à effectuer, par programme, afin de sélectionner la gamme de mesures ±8 G.

**Il faut forcer les bits FS0 et FS1 du registre CTRL\_REG2 de telle façon que FS0=1 et FS0=0 (Tables 24 et 25, page 25).**

* 1. Indiquer, en considérant de plus que les données de 16 bits sont exprimées au format Little Endian, le résultat de mesure Nx exprimé en décimal et en hexadécimal si l’intensité de l’induction du champ magnétique mesurée selon l’axe x, Bx, est égale à 2,75 G.

**Il faut configurer le format Little Endian en forçant le bit BLE du registre CTRL\_REG4 à 0 (Tables 29 et 30, page 26).**

**Pour Bx = 2,75 G, on obtiendra Nx = arrondi à la valeur entière la plus proche de 2,75x3421, soit Nx = 9408 = 0x24C0.**

**On aura donc, au format Little Endian, OUT\_X\_L = 0xC0 et OUT\_X\_H = 0x24.**

* 1. Toujours dans les mêmes conditions, indiquer l’intensité de l’induction magnétique By mesurée selon l’axe y si le résultat de mesure Ny est égale à 0xF2F0.

**0xF2F0 est une valeur négative égale à – 3344.**

**By est par conséquent égale à , soit By = - 977 mG.**

* 1. Préciser l’action à effectuer pour que le composant élabore une requête d’interruption (front montant sur la sortie INT) lorsque la valeur de l’induction du champ magnétique Bx est supérieure à 2,75 G.

**Il faut :**

* **autoriser l’élaboration du signal d’interruption sur la broche de sortie INT en forçant le bit IEN du registre INT\_CFG à 1 (Tables 36 et 37, page 29) ;**
* **configurer la broche de sortie INT de telle façon qu’elle présente un front montant à l’instant d’interruption en forçant le bit IEA du registre INT\_CFG à 1 (Tables 36 et 37, page 29) ;**
* **valider le fonctionnement sous régime d’interruption associé à la mesure de Bx en forçant le bit XIEN du registre INT\_CFG à 1 (Tables 36 et 37, page 29) ;**
* **préciser que l’interruption devra se déclencher lorsque la valeur de Bx mesurée dépasse une valeur positive en forçant le bit PTH\_X du registre INT\_SRC à 1 (Tables 38 et 39, page 29) ;**
* **préciser la valeur du seuil de Bx (2,75 G) au-delà de laquelle une requête d’interruption doit être élaborée, en mémorisant dans les registres INT\_TS\_L et INT\_TS\_H la valeur de Nx = 0x24C0 (voir question 5.7), soit INT\_TS\_L = 0xC0 et INT\_TS\_H = 0x24.**

1. **Le câblage du composant LIS3MDL sur la carte End Device (schéma page 2 sur 4)**
   1. Justifier le câblage des broches d’alimentation Vdd et Vdd\_IO du composant LIS3MDL.

**Puisque la tension d’alimentation du µC est de 3,3 V, on peut connecter les deux broches Vdd et Vdd\_IO à ce potentiel (voir réponse à la question 4.3).**

* 1. 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 LIS3MDL.

**Le concepteur a choisi de piloter le composant BME280 à l’aide d’une interface I2C.**

* 1. Justifier le câblage des broches CS et SA1.

**La broche CS est connectée au niveau logique haut, ce qui permet de sélectionner l’interface de communication I2C (voir réponse à la question 4.4).**

**La broche SA1 est connectée au niveau logique haut, ce qui permet d’attribuer au composant, l’adresse 0x1E (voir réponse à la question 4.6).**

* 1. Justifier l’information « Adr I2C $1E » mentionnée sur le schéma structurel.

**Cette information indique l’adresse du composant (il s’agit bien de l’adresse 0x1E).**

* 1. Justifier la présence et le rôle des résistances R43 et R44.

**Les résistances R43 et R44 sont des résistances de Pull-Up (ou résistances de tirage au niveau haut, en français) dont le rôle consiste à forcer les lignes SDA et SCL au niveau haut en l’absence de communication.**

* 1. Indiquer, en considérant la présence de la résistance R42, 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 LIS3MDL.

**Si le cavalier J40 est ouvert, la broche d’entrée d’interruption GPIO33 est forcée au niveau haut par R42, ce qui signifie qu’on ne pourra signifier au µC la présence d’une requête d’interruption, qu’en lui transmettant un front descendant.**

**Par conséquent, si l’on souhaite que le composant LIS3MDL puisse élaborer une requête d’interruption auprès du µC, il faudra configurer la sortie d’interruption INT du composant pour qu’elle soit active sur un front descendant.**