

ORL Mag 95

ORGANE OFFICIEL D'EXPRESSION DES **INSTANCES NATIONALES
DE L'ORL ET DE LA CHIRURGIE CERVICO-FACIALE**

FÉVRIER 2023

LA VIE DE LA SFORL

Webinars de la SFORL en 2023... p 7

Formations présentiellees p 8

Prix Posters Congrès SFORL 2022 /

Bourses de la SFORL 2022... p 10 /11

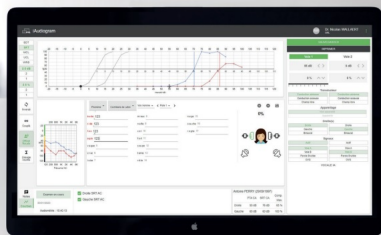
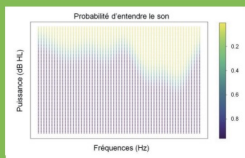
Il Signor Zola, atteint d'une tumeur ORL : premier patient traité par immunothé- rapie dans l'Histoire..... p 20

Drs Joey MARTIN et Robin BAUDOQUIN



Audiométrie tonale automatisée par Intelligence Artificielle : principe de fonctionnement d'Audiogram..... p 24

Drs Nicolas WALLAERT,
Hadrien JEAN
et Nihaad PARAOUTY



Audiométrie tonale automatisée par Intelligence Artificielle : principe de fonctionnement d'iAudiogram

Nicolas Wallaert^{1,2}, Hadrien Jean^{1,3}, Nihaad Paracouty^{1,4}

1. iAudiogram, 5 Bis Cours Anatole France, 51100 Reims, France
2. Audioprothésiste D.E., Master Audiologie et Troubles du Langages, Ingénieur en Acoustique, Docteur en Sciences Cognitives (PhD), Membre du Collège National d'Audioprothèse
3. Data scientist, Machine learning scientist, Docteur en Sciences Cognitives (PhD)
4. Translational auditory scientist, Docteur en Sciences Cognitives (PhD)

RÉSUMÉ

Durant les cinq dernières années, le projet iAudiogram aura rassemblé chercheurs et cliniciens pour tenter de concevoir et développer une nouvelle génération d'audiomètre, intelligent, qui permettrait de réaliser de façon entièrement automatisée l'intégralité des tests audiométriques grâce à l'utilisation d'algorithmes d'Intelligence Artificielle (IA). Les tests sont conduits automatiquement, en autonomie par le patient sous le contrôle des médecins ORL, seuls praticiens à même d'interpréter ses résultats audiométriques, de les confronter au tableau clinique pour aboutir sur la pose du diagnostic, pour lequel leur expertise médicale est essentielle. Ainsi, iAudiogram a été conçu, implémenté, et validé scientifiquement et sera très prochainement marqué CE en tant que dispositif médical (classe IIa). Le projet iAudiogram a d'ores et déjà été primé à plusieurs reprises tant par les pouvoirs publics que par la communauté scientifique et ORL (Lauréat i-Nov 2020, Prix Innovation Médicale SFORL 2022, Prix de la Fondation pour l'Audition 2022, Prix du Projet Deeptech 2022 Grand Est). À terme, iAudiogram souhaite pouvoir favoriser l'accès à un diagnostic otologique médical de qualité pour chaque patient, en positionnant le médecin ORL en chef d'orchestre de la prise en charge otologique et audiolinguale, tout en favorisant la recherche scientifique pour mieux comprendre les mécanismes physiopathologiques impliqués dans la surdité.

Principes de fonctionnement d'iAudiogram et de son audiométrie tonale automatisée par IA

L'audiométrie tonale consiste en une estimation des seuils de détection de sons purs présentés dans le silence (Hughson & Westlake, 1944). L'automatisation par IA implémentée par iAudiogram, et validée scientifiquement, comporte plusieurs étapes clés décrites ci-dessous. Pour chaque étape, l'article se divise en une section « objectifs », qui vise à expliquer la finalité de l'étape réalisée, et en une section « principes », auquel le praticien intéressé pourra se référer, détaillant les étapes algorithmiques et computationnelles utilisées pour y parvenir.

Étape 1: phase d'initialisation

Objectifs

1. Cette phase vise à encadrer de façon globale et très rapidement la zone au sein de laquelle le seuil liminaire peut potentiellement se trouver, de façon à fournir à l'algorithme d'IA (utilisé lors de l'étape 2) des informations grossières sur la zone d'intérêt. Toutefois, l'algorithme d'IA pourra éventuellement a posteriori sortir de cette zone initiale d'intérêt, notamment si les réponses ultérieures sont contradictoires avec les points obtenus lors de cette phase d'initialisation, suggérant ainsi que certaines réponses du sujet pourraient être erronées.

2. Pour le patient, cette phase vise à le familiariser avec la tâche qui lui est demandée, c'est-à-dire détecter un

son pur pulsé dans l'oreille testée, en présence d'un masquage controlatéral dans l'oreille non testée. Cette phase ne présente pas de difficulté particulière initialement, car la plupart des sons utilisés sont relativement éloignés du seuil liminaire du patient, et sont donc soit très audibles ou totalement inaudibles.

3. Pour le praticien, cette phase permet de s'assurer en quelques secondes que l'examen a été correctement paramétré, et de vérifier que le patient a compris correctement les consignes.

Principes

Le patient est installé dans une cabine audiométrique avec l'intégralité des transducteurs nécessaires pour la réalisation de l'examen : casque conduction aérienne (CA) et conduction osseuse (CO). Il lui est demandé d'appuyer sur un bouton dès qu'il entend des tonalités ('son test'), sans s'occuper de la présence éventuelle d'un bruit continu (masquage controlatéral). Lors de cette phase d'initialisation, l'algorithme d'IA établira rapidement et grossièrement (à 20 ou 30 dB près) une zone d'intérêt - au sein de laquelle le seuil auditif du patient est susceptible d'être. Ainsi, l'examen démarre à 1 kHz, à une intensité de 60 dB :

i. Si le patient dit entendre, le niveau d'intensité du prochain son testé est diminué de 20 dB à la même fréquence.

ii. Si le patient dit ne rien entendre, le niveau d'intensité augmente de 20 dB à la même fréquence.

Dès lors qu'au moins une réponse positive (c.a.d., le patient dit avoir entendu) et une réponse négative (c.a.d., le patient dit ne rien avoir entendu) sont obtenues à la fréquence testée, l'algorithme passe à la fréquence suivante (e.g. 2, 4, 6 et 8 kHz pour finir avec 0,5, 0,25, et 0,125 kHz). La phase d'initialisation est terminée lorsque toutes les fréquences audiométriques habituelles ont été "testées".

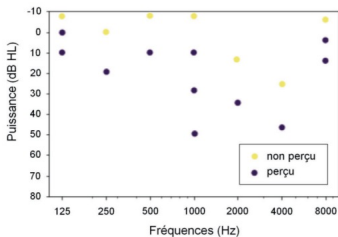


Figure 1 : Exemple de réponses obtenues pour un patient à l'issue de la phase d'initialisation. Une vingtaine de points a été testée, et le patient a pour chacune des fréquences audiométriques habituelles, indiqué au moins une fois qu'il entendait, et au moins une fois qu'il n'entendait pas le son test (une réponse positive et une réponse négative).

Étape 2 : phase de prétest IA

La phase d'audiométrie automatisée par IA commence après la phase d'initialisation. Elle se base entre autres sur des algorithmes d'apprentissage actif ("active learning"). Contrairement au cadre classique où les données sont connues et imposées, l'apprentissage actif (modèle d'apprentissage semi-supervisé), se caractérise par le fait que c'est l'algorithme d'apprentissage automatique qui demande des informations pour des données précises aux humains.

Factuellement, l'apprentissage actif permet à un programme d'IA d'identifier les données dont il a besoin pour s'améliorer. Dans le cas de l'audiométrie, l'algorithme d'IA va devoir estimer l'audiogramme du patient à partir 1) des réponses que le patient lui a déjà fournies, et 2) des prérequis et autres connaissances initiales que l'algorithme aura appris. L'algorithme déterminera ensuite s'il a besoin d'informations supplémentaires à demander au patient (par exemple, test d'un prochain son test), où s'il peut arrêter le test dès à présent, car l'estimation du seuil audiométrique est déjà suffisamment précise. Ce processus est itératif, c'est-à-dire qu'il sera répété après chacune des réponses données par le patient.

Étape 2.1 : Création d'une grille audiométrique artificielle

Objectifs

L'audiogramme habituel, ou du moins sa résolution est ici modifiée pour dessiner une grille artificielle, qui va mailler de façon très précise l'espace fréquence et intensité, de sorte que l'on a un point pour chaque couple intensité/fréquence (Hz/dB HL). Ainsi, chacun des couples fréquences/intensités correspond à un point sur cette grille artificielle. Pour chacun des points, l'algorithme d'IA va calculer la probabilité que ce point soit entendu à partir des points qui ont déjà été testés (dans la phase d'initialisation) et des connaissances apprises par l'algorithme au préalable.

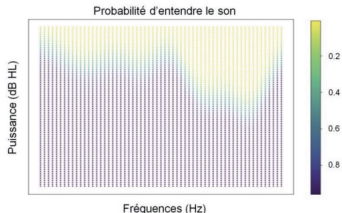


Figure 2 : Grille audiométrique artificielle calculée par l'algorithme d'IA visant à déterminer, pour chaque fréquence et pour chaque intensité, la probabilité que le patient à d'entendre ou non le son.

Principes

Pour classifier les sons entre ceux qui ont été entendus et ceux qui ne l'ont pas été, des travaux pionniers (Song et al., 2015 ; Cox & de Vries, 2015 ; Schlittenlacher et al., 2018 ; Barbour et al., 2019) ont utilisé un processus gaussien (GP ; Ramussen et Williams, 2006) que nous avons repris. Le processus gaussien incorpore certaines connaissances a priori, notamment la covariance attendue entre les points audiométriques. Par exemple, sur le plan fréquentiel, une relation exponentielle a été imposée de façon à rendre compte du fait que les seuils à des fréquences adjacentes sont corrélés (Bisgaard et al., 2010). En d'autres termes, cela contraint l'algorithme à ne pas décorréler deux points audiométriques proches en fréquence de façon à éviter que l'un puisse par exemple être estimé à 0 dB HL à 1000 Hz et à 120 dB HL à 1100 Hz. De la même façon, sur le plan de l'intensité, une relation linéaire est imposée pour rendre compte du fait que la probabilité qu'un son soit entendu augmente lorsque l'on augmente l'intensité. Ce paramétrage préalable du GP ainsi que les données obtenues lors de la phase d'initialisation sont utilisés pour générer une fonction latente, qui par le biais d'une fonction de vraisemblance donne la probabilité qu'un son d'une certaine fréquence soit entendu en fonction de l'intensité.

Étape 2.2 : Première estimation des seuils audiométriques et de l'incertitude

Objectifs

À partir de la grille artificielle de probabilité obtenue dans l'étape précédente, l'algorithme d'IA établit une première estimation des seuils audiométriques du patient à 1 dB et 1 Hz près, ainsi qu'une estimation de l'incertitude associée aux seuils, de manière continue en fréquence.

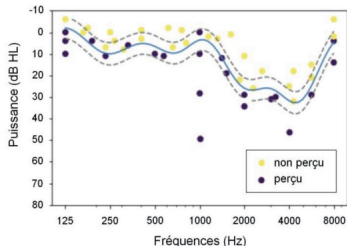


Figure 3 : Première estimation des seuils audiométriques (ligne continue) du patient, ainsi que l'incertitude associée aux seuils (lignes en pointillés ; écarts types de +1 et -1). Les seuils et l'incertitude sont obtenus à partir des réponses du patient lors de la phase d'initialisation et de la grille artificielle de probabilité déterminée par l'IA.

Principes

Cette première estimation de l'audiogramme du patient correspond aux points de la grille audiométrique virtuelle ayant une valeur proche d'une probabilité de détection donnée, par exemple 0,5 (Figure 3, ligne continue). Ces points correspondent à la zone audiométrique pour laquelle les points sélectionnés ont autant de chance d'être détectés que de ne pas l'être. Par ailleurs, la fonction GP peut estimer la valeur de l'incertitude associée à ces probabilités, pour déterminer si l'incertitude associée à la probabilité de détecter une tonalité pour une combinaison donnée de fréquence/intensité est élevée ou si au contraire elle est confiante dans son évaluation. Les lignes en pointillés (Figure 3) représentent les écarts types autour de l'estimation du seuil audiométrique établi par l'IA à partir de la connaissance de sa propre incertitude.

Étape 3 : phase de test IA

Étape 3.1 : Choix du prochain son à tester

Objectifs

Une fois que cette première estimation de l'audiogramme est établie, l'algorithme d'IA déterminera ensuite le prochain son à présenter au patient. Pour choisir le prochain point à tester, l'IA utilisera l'incertitude associée à chaque point (fréquence/intensité) de la grille artificielle de façon à converger le plus rapidement possible vers une estimation précise des seuils audiométriques du patient. Afin d'obtenir le maximum d'information, l'algorithme d'IA choisira donc le point (fréquence/intensité) susceptible d'entraîner la plus grande diminution d'incertitude de la fonction GP.

Ce point est généralement proche des seuils auditifs estimés et est associé à une forte incertitude (c.a.d., est éloigné des sons déjà testés dans la phase d'initialisation, ou vise à retester une zone audiométrique au sein de laquelle les réponses données par le patient ont été contradictoires). Durant cette phase, les sons tests choisis par l'IA ne se limitent plus aux seules fréquences audiométriques habituelles et sont réalisés au dB et au Hz près. Par ailleurs, dans la mesure où l'IA vise à maximiser l'information obtenue, la fréquence et l'intensité du son test varie entre chaque essai. Les sons tests ne seront plus prévisibles pour le patient, ce qui contraint les effets de prédiction et les possibilités de simulation.

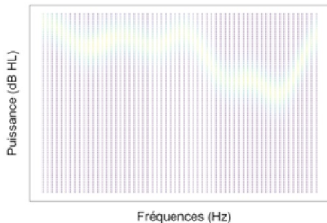


Figure 4 : Exemple de l'incertitude associée aux seuils audiométriques. L'algorithme d'IA va sélectionner le point qui maximise l'information, c'est-à-dire le point ayant l'incertitude la plus élevée qui permettra de converger le plus rapidement possible vers l'obtention des seuils du patient.

Principes

Sur la base de la fonction GP, l'algorithme d'apprentissage actif doit également choisir les caractéristiques (fréquence et intensité) du prochain son test à présenter au patient.

Dans un souci d'efficacité, le prochain son test est choisi de sorte à minimiser l'incertitude sur l'ensemble de la fonction GP. Houlisby et al. (2011) ont exploité le fait que l'information mutuelle (Shannon, 1948) entre la réponse attendue et la fonction GP ne nécessite pas nécessairement de calculer l'entropie de la fonction GP (trop coûteux), mais peut être calculée à la place sur la base de l'entropie de la réponse attendue. Cela rend possible l'utilisation de l'apprentissage actif dans les tests psychophysiques et plus particulièrement en audiométrie où les paramètres de tests doivent être calculés rapidement entre les essais. Cette méthode avait d'ores et déjà été appliquée avec succès en audiométrie (Gardner et al., 2015) et a donc été reprise.

Étape 3.2 : Critères de fin de test

Objectifs

Après chacun des sons tests, les étapes 2 et 3 sont répétées afin d'estimer en permanence :

- i. le seuil audiométrique,
- ii. l'incertitude associée, et
- iii. le prochain son test qui pourrait minimiser l'incertitude sur l'ensemble de la fonction GP.

Toutefois, l'IA est également apte à déterminer à quel moment il convient d'arrêter l'examen audiométrique. Ainsi, l'IA va suivre en permanence deux métriques distinctes :

1. L'incertitude maximale en dB associée à l'estimation du seuil liminaire, et
2. le nombre de points audiométriques ayant été testés.

Le monitoring de la première métrique permet à l'IA d'interrompre automatiquement le test dès lors que la précision audiométrique obtenue dépasse celle qui a été exigée par le praticien.

En d'autres termes, l'audiométrie s'arrête dès lors que le point le plus incertain présente une valeur d'incertitude plus faible que la précision demandée par le praticien lors du lancement de l'examen.

En effet, le praticien peut déterminer au préalable le choix de la précision audiométrique qu'il souhaite obtenir (e.g., audiométrie au dB près, à 5 dB près). De façon logique, plus la précision demandée est importante, plus la durée de l'examen augmente. La durée de l'obtention d'une courbe audiométrique continue en fréquence varie de 2 min 30 sec par oreille pour une précision fixée à 5 dB et culmine à environ 5 à 6 min par oreille pour avoir 1 dB de précision.

La seconde métrique permet à l'IA d'interrompre automatiquement le test dès lors que le nombre de points testés dépasse un certain seuil. Ce seuil est fixé au préalable comme étant le point auquel, pour 90 % des patients, l'incertitude souhaitée aurait déjà été atteinte. Ce seuil permet de limiter la durée du test de

sorte à être utilisable en pratique clinique courante (environ 3 à 5 min par patient par oreille) et à éviter à ce que l'examen ne dure trop longtemps pour des patients qui donnent des réponses variables ou incohérentes. Dans le cas où l'IA interrompt le test sans atteindre la précision demandée par le praticien, ce dernier pourra contrôler a posteriori l'intervalle d'incertitude (qui sera plus grand qu'attendu) et vérifier chacune des réponses du patient pour tous les points choisis et testés. Une validation et/ou vérification manuelle des seuils audiométriques peut également être faite si le praticien le souhaite.

Avantages clés de l'audiométrie automatisée par IA

1. Compensation des erreurs effectuées par le patient

Pour des tests automatisés, la compensation des erreurs réalisées, volontairement ou involontairement par le patient, est un point clé. La quantification du taux d'erreur dans la réponse des sujets est un élément primordial pour le bon fonctionnement des algorithmes d'IA et de machine learning. En effet, l'introduction d'un taux d'erreur encourage les méthodes d'apprentissage actif à tester davantage de points. Ainsi l'IA peut corriger (dans la limite du raisonnable) les réponses aberrantes d'un sujet, en allant vérifier les points jugés comme incertains. Par exemple, dans la Figure 5, l'IA évalue à plusieurs reprises les seuils du patient autour de 250 Hz étant donné les 2 réponses négatives obtenues à cette fréquence à 40 et à 60 dB HL (triangles noirs). L'estimation finale des seuils audiométriques (n'est donc pas impactée par les réponses erronées du patient.

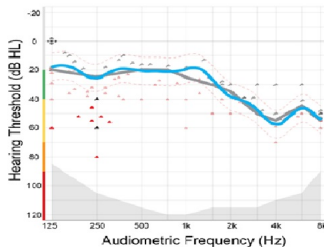


Figure 5 : Similarité entre le seuil liminaire d'un patient obtenu manuellement (ligne grise) et automatiquement par IA (ligne bleue) malgré une variabilité de réponses autour de 250 Hz. L'intervalle d'incertitude pour le test automatisé par IA (lignes en pointillés) est relativement élevé, car le patient s'est trompé à deux reprises dans ces réponses autour de 250 Hz (triangles noirs = dit ne pas avoir entendu à 40 et à 60 dB HL). Afin d'infirmer ces points erronés, l'IA a testé un nuage de points supplémentaires.

2. Audiométrie automatisée en CA et CO avec masquage controlatéral automatisé

Afin d'estimer correctement l'audiométrie tant en CA qu'en CO de façon fiable par IA, la réalisation d'un masquage controlatéral a été automatisée (brevet iAudiogram). Lorsqu'une audiométrie en CO est demandée, le praticien doit renseigner préalablement le résultat du test de Weber réalisé lors de l'examen clinique.

Principes

Pour le calcul des niveaux de bruit masquant nécessaires pour respecter les critères d'efficacité et de retentissement, différentes hypothèses ont été réalisées au préalable :

- Le masquage controlatéral s'active automatiquement dès lors que le son test dépasse 40 dB HL en CA.
- La valeur du transfert transcrânien retenue pour le calcul du masquage s'ajuste automatiquement en fonction de la fréquence et du transducteur utilisé.
- Lorsque le niveau de masquage permettant de respecter le critère d'efficacité devient strictement supérieur au niveau de masquage permettant de respecter le critère de non-retentissement, la valeur du transfert transcrânien est progressivement réduite jusqu'au respect des deux critères, avec une valeur minimale de transfert transcrânien fixée à 40 dB en CA et à 0 dB en CO. Lorsque le seuil de 40 dB est atteint, un message d'avertissement apparaît à l'issue de l'audiométrie invitant le praticien à la prudence dans l'interprétation des données et en l'encourageant à réaliser un masquage ipsilatéral de Rainville.

- La valeur du Rinne est estimée à la fréquence testée à partir du seuil auditif controlatéral et sa concordance avec le test de Weber est évaluée.

- Le rapport signal sur bruit (RS/B) au niveau de l'oreille interne masquée nécessaire pour respecter le critère d'efficacité de masquage est fixé à -20 dB.

- Le RS/B au niveau de l'oreille interne testée nécessaire pour respecter le critère de non-retentissement est fixé à 0 dB.

- L'intensité de masquage maximale est fixée à 85 dB HL. Si ce niveau d'intensité s'avère être insuffisant pour respecter le critère d'efficacité, un message d'avertissement apparaît à l'issue de l'audiométrie invitant le praticien à la prudence dans l'interprétation des données.

3. Estimation de la fiabilité des réponses fournies par le patient

L'audiométrie automatisée par IA implémentée par iAudiogram présente l'avantage de fournir une mesure de fiabilité des réponses fournies durant l'audiométrie automatisée : la combinaison de différents algorithmes permet d'estimer, fréquence par fréquence, le degré d'incertitude associé à l'estimation du seuil audiométrique. Par ailleurs, le praticien peut évaluer a posteriori en un coup d'œil, si chacune des réponses effectuées par le patient est cohérente comparativement aux seuils audiométriques fournis par l'IA.

4. Estimation de l'audition continue en fréquence

L'audiométrie automatisée par IA fournit une estimation du seuil auditif continue en fréquence et qui ne se limite plus aux seules fréquences audiométriques. Cette information supplémentaire, si elle n'est pas indispensable pour la prise en charge de certains patients, pourrait permettre d'améliorer la caractérisation de l'audition de certains patients, et éventuellement leur prise en charge (détection de scotomes ciblés, patients acouphéniques, audiométrie hautes fréquences, détection de zones mortes cochléaires, ...).

Les études cliniques de validation sont en cours de finalisation et les résultats seront présentés dans un prochain numéro d'ORL Mag.

Pour plus d'information ou voir concrètement le déroulement des tests automatisés par IA, n'hésitez pas à consulter notre site internet : www.iaudiogram.com, ou à vous rendre sur <https://iaudiogram.com/support/#Academy>, pour accéder à de nombreuses informations (vidéos, revues de littératures, webinaires, extraits d'articles scientifiques) au sujet de l'IA en audiologie.



Flashez-moi
pour voir le déroulement
d'une audiométrie tonale
automatisée par IA en vidéo !

Références

- Barbour, D. L., Howard, R. T., Song, X. D., Metzger, N., Sukesan, K. A., DiLorenzo, J. C., ... & Heisey, K. L. (2019). Online machine learning audiometry. *Ear and hearing*, 40(4), 918.
- Bisgaard, N., Vlaming, M. S., & Dahlquist, M. (2010). Standard audiograms for the IEC 60118-15 measurement procedure. *Trends in amplification*, 14(2), 113-120.
- Cox, M., & de Vries, B. (2015). A Bayesian binary classification approach to pure tone audiometry. *arXiv preprint arXiv:1511.08670*.
- Gardner, J. R., Song, X., Weinberger, K. Q., Barbour, D. L., & Cunningham, J. P. (2015, July). Psychophysical detection testing with Bayesian active learning. In *UAI* (pp. 286-295).
- Houlisby, N., Huszár, F., Ghahramani, Z., & Lengyel, M. (2011). Bayesian active learning for classification and preference learning. *arXiv preprint arXiv:1112.5745*.
- Hughson, W., & Westlake, H. D. (1944). *Manual for program outline for rehabilitation of aural casualties both military and civilian: sponsored by the American Academy of Ophthalmology and Otolaryngology*. Douglas Print Company.
- Schlitzenlacher, J., Turner, R. E., & Moore, B. C. (2018). Audiogram estimation using Bayesian active learning. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 144(1), 421-430.
- Shannon, C. E. (1948). "A mathematical theory of communication," *Bell Syst. Tech. J.* 27, 379-423, 623-656.
- Song, X. D., Wallace, B. M., Gardner, J. R., Ledbetter, N. M., Weinberger, K. Q., & Barbour, D. L. (2015). Fast, continuous audiogram estimation using machine learning. *Ear and hearing*, 36(6), e326.
- Williams, C. K., & Rasmussen, C. E. (2006). *Gaussian processes for machine learning* (Vol. 2, No. 3, p. 4). Cambridge, MA: MIT press.