

Eindrapport

LITERATUURSTUDIE, MARKTONDERZOEK EN MULTICRITERIA-ANALYSE BETREFFENDE LUCHTKWALITEITSSENSOREN EN SENSORBOXEN

Jan Peters, Martine Van Poppel

2020/HEALTH/R/2098

Maart 2020



VITO NV

Boeretang 200 - 2400 MOL - BELGIE
Tel. + 32 14 33 55 11 - Fax + 32 14 33 55 99
vito@vito.be - www.vito.be

BTW BE-0244.195.916 RPR (Turnhout)
Bank 375-1117354-90 ING
BE34 3751 1173 5490 - BBRUBEBB

Alle rechten, waaronder het auteursrecht, op de informatie vermeld in dit document berusten bij de Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek NV ("VITO"), Boeretang 200, BE-2400 Mol, RPR Turnhout BTW BE 0244.195.916. De informatie zoals verstrekt in dit document is vertrouwelijke informatie van VITO. Zonder de voorafgaande schriftelijke toestemming van VITO mag dit document niet worden gereproduceerd of verspreid worden noch geheel of gedeeltelijk gebruikt worden voor het instellen van claims, voor het voeren van gerechtelijke procedures, voor reclame of antireclame en ten behoeve van werving in meer algemene zin aangewend worden

INHOUD

Inhoud	I
Lijst van figuren	I
Lijst van tabellen	II
HOOFDSTUK 1. Inleiding	1
HOOFDSTUK 2. Sensoren en sensorboxen	3
2.1. Definities	3
2.2. Overzicht sensorboxen	6
2.3. Overzicht specificaties sensorboxen	7
2.4. Overzicht specificaties sensoren	9
HOOFDSTUK 3. Sensor test protocols en infrastructuur	10
3.1. Belangrijke initiatieven op het vlak van sensor testen en infrastructuur	10
3.1.1. AQ-SPEC	10
3.1.2. JRC test programma en infrastructuur	10
3.1.3. US-EPA	10
3.1.4. LCSQA (laboratoire Central de surveillance de la Qualité de l’Air)	11
3.1.5. AirLab	12
3.1.6. VAQUUMS	14
3.2. Test protocols	15
3.2.1. AQ-SPEC	15
3.2.2. JRC	21
3.2.3. CEN/TC264/WG42	21
3.2.4. LCSQA	23
3.2.5. US-EPA	25
3.2.6. AirLab	26
3.2.7. Vaquums	27
3.3. Sensornetwork pilot studies in Europese steden	28
HOOFDSTUK 4. Kwaliteit sensor metingen	29
4.1. Overzichtsartikel	29
4.2. LCSQA	35
4.3. AQ-SPEC	39
4.4. AirLab	39
4.5. Overzichtstabel	42
HOOFDSTUK 5. Marktbevraging	44
5.1. Vragenlijst	45
5.2. Overzicht antwoorden	46

5.2.1.	Specificaties	46
5.2.2.	Gebruik	51
5.2.3.	Data	58
5.2.4.	Kostprijs	63
5.3.	<i>Samenvatting</i>	70
HOOFDSTUK 6.	Multi-criteria analyse	72
6.1.	<i>Bestaande systemen</i>	72
6.2.	<i>Overleg met de stuurgroep</i>	73
6.3.	<i>Workshop steden en gemeenten</i>	74
6.4.	<i>Uitwerken selectietool op basis van multicriteria analyse</i>	75
6.5.	<i>Cases</i>	76
6.5.1.	Case in Kampenhout: schoolomgeving	76
6.5.2.	Case in Sint-Niklaas: uitrol proefproject sensoren	81
6.5.3.	Case Schoten: sensor uitrol	82
HOOFDSTUK 7.	Besluit	84
Literatuurlijst		87
Bijlage A		89
Bijlage B		105

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1: Deelnemende sensorboxen aan de Microsensor Challenge georganiseerd door AirLab in 2018 en 2019.	14
Figuur 2: Summary report gebruikt door AQ-SPEC om resultaten van veld- en labotesten samen te vatten	16
Figuur 3: Schematische voorstelling van de AQ-SPEC test kamer	18
Figuur 4: Afbeelding van de verschillende onderdelen van de AQ-SPEC test infrastructuur	18
Figuur 5: Test set-up voor testen van gassensoren gebruikt door LCSQA	24
Figuur 6: Overzicht van de sensorboxen die deelnamen aan de test: één-sensor systemen (blauw) en multi-sensor systemen.	36
Figuur 7: Overzicht van prestaties van sensorboxen voor PM2,5, PM10 en NO2 (gereproduceerd uit AirLab MicroSensors Challenge 2019).	41
Figuur 8: Evaluatieradar zoals voorgesteld door Spinelle et al.2018 (bron: persoonlijke communicatie en ontwerp-rapport)	73
Figuur 9: Flow voor de concrete bepaling van concepten.	74

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1: Typische concentraties gebruikt bij labotesten in AQ-SPEC	19
Tabel 2: Tabel met interferenties per type sensor (bron Polidori et al., 2016)	20
Tabel 3: Overzicht resultaten sensorbox testen door LCSQA.	38
Tabel 4: Overzicht van de sensorboxen die deelnamen aan de Microsensor Challenge 2019 van AirLabs met weergave of pollutanten PM _{2,5} , NO ₂ en O ₃ al dan niet gemeten worden.	40
Tabel 5: Lijst van geselecteerde sensorboxen en firma's voor de marktbevraging.	44
Tabel 6: Antwoorden op vragen m.b.t. sensorbox specificaties.	47
Tabel 7: Antwoorden op vragen m.b.t. gebruik van de sensorbox.	52
Tabel 8: Antwoorden op vragen m.b.t. data communicatie, opslag, calibratie en visualisatie.	59
Tabel 9: Antwoorden op vragen m.b.t. kostprijs van sensorbox en uitbouw netwerk.	64
Tabel 10: Samenvattende tabel met resultaten van de marktbevraging.	70
Tabel 11: Stroomvoorzieningsmogelijkheden voor een selectie van sensorboxen.	71
Tabel 12: Oplijsting selectie criteria voor de case in Kampenhout en prestaties van sensorboxen.	80

HOOFDSTUK 1. INLEIDING

- **Algemene context**

Luchtkwaliteit is een voorname bekommernis van burgers en beleidsmakers. Kennis van luchtkwaliteit kan steden en gemeenten meer inzicht geven in processen die deze beïnvloeden, een draagvlak creëren voor maatregelen (vb. invoeren van een wijkcirculatieplan) en burgers op gepaste wijze informeren over luchtkwaliteit. Informatie over luchtkwaliteit geeft ook de mogelijkheid om snel in te spelen op ongunstige condities (vb. advies rond houtverbranding), zal inzichten opleveren op lange termijn en kan informatie geven aan burgers zodat ze de juiste keuzes kunnen maken in verband met hun gezondheid.

Omdat luchtkwaliteit zowel in ruimte als in tijd sterk variabel is, is het van belang om de luchtkwaliteit lokaal te meten op een continue wijze. Echter, in vele steden en gemeenten is er geen meetstation aanwezig omwille van de hoge kostprijs van referentie meetapparatuur. Bovendien is de aanwezigheid van één station vaak onvoldoende om de gewenste gedetailleerde informatie te bekomen.

Een sensornetwerk gebaseerd op goedkopere sensoren kan hier een alternatief bieden. De laatste jaren is er heel wat ontwikkeling gebeurd op het vlak van betaalbare sensoren voor luchtkwaliteitsmetingen en op het vlak van sensorintegratie in netwerken als IoT-toepassingen (Internet of Things). Bij de meeste steden en gemeenten ontbreekt echter de expertise om de juiste sensoren te selecteren en te valideren, een sensornetwerk op te zetten en de data correct te interpreteren.

Om aan deze nood tegemoet te komen hebben een aantal gemeenten de krachten gebundeld en een 'City of Things' project gedefinieerd met als doel het verwerven van de noodzakelijke kennis rond het opzetten van een sensornetwerk voor luchtkwaliteitsmetingen, het in kaart brengen van de nodige technologische vereisten en inzicht te verkrijgen in de communicatie van de meetresultaten naar de burgers.

- **City of Things project**

Door de Gemeente Kampenhout, Stad Sint-Niklaas, Gemeente Schoten, Gemeente Dilbeek en Stad Oudenaarde werd een project ingediend binnen de oproep 'City of Things' van het Vlaams Agentschap Innoveren & Ondernemen (VLAIO) nl. **'Gemeentelijk sensornetwerk voor luchtkwaliteitsmetingen'**.

Met dit project willen de gemeenten op een innovatieve manier invulling geven aan luchtkwaliteitsmetingen in een slimme gemeente. Doel is om dit te doen met behulp van een sensornetwerk van betaalbare sensoren voor luchtkwaliteit.

In 'City of Things'-project willen de gemeenten inzetten op innovatieve technieken, maar willen ze er tegelijkertijd op toezien dat de nodige kalibraties en controles worden uitgevoerd zodat de data betrouwbaar zijn. Een sensornetwerk kan enkel kwaliteitsvolle data aanleveren wanneer de juiste sensoren worden geselecteerd en gekalibreerd, en wanneer de data op een correcte manier worden

gevalideerd. Bovendien zijn er nog uitdagingen in verband met het opstellen en onderhoud van een sensornetwerk, de integratie ervan in IoT, de interpretatie en communicatie van de meetgegevens en eventueel de integratie van dit alles in bestaande systemen.

Doel van dit project is het verwerven van de noodzakelijke kennis rond het opzetten van een sensornetwerk voor luchtkwaliteitsmetingen, het in kaart brengen van de nodige technologische vereisten op het vlak van hardware en software alsook het inzicht verkrijgen in de communicatie van de meetresultaten naar de burgers. Verder wordt bekeken hoe de gegevens op het niveau van een gemeente of stad (klein tot middelgroot) kunnen gebruikt worden en wat dit betekent voor specifieke vereisten van het sensornetwerk. Tenslotte worden er ook een aantal testcases opgezet. Na de succesvolle toepassing, kunnen opgedane inzichten gebruikt worden voor andere steden en gemeenten om op grotere schaal gelijkaardige netwerken uit te rollen (multiplicatoreffect).

Het resultaat van dit project is een plan van aanpak en een beschrijving van systeemvereisten voor een sensornetwerk voor luchtkwaliteit, dat later door gemeenten en steden gebruikt kan worden.

- **Deze opdracht**

Een belangrijke stap om te komen tot een kwaliteitsvol sensornetwerk voor luchtkwaliteit is de juiste selectie van de sensor(box)en. Met deze opdracht willen de gemeenten zicht krijgen op de stand van zaken van de beschikbare kennis over sensoren en sensorboxen, en de beschikbaarheid van sensor(box)en op de markt. Op basis van deze opdracht moeten ze een gefundeerde selectie kunnen maken van sensor(box)en voor bepaalde toepassingen. Deze opdracht omvat het maken van een literatuurstudie, een marktstudie en een multicriteria-analyse (MCA) om de gemeenten meer inzicht te geven om te komen tot de gepaste selectie.

Een andere taak van het 'City of Things' project is het bepalen van de functionele vereisten waarvoor een workshop georganiseerd wordt voor de gemeenten. De workshop en de analyse ervan maakt geen deel uit van deze opdracht maar de uitkomst zal wel gebruikt worden als basis voor het opstellen van de MCA in deze studie.

De uitkomst van deze opdracht kan dan verder gebruikt worden om de juiste selectie te maken om in een latere fase een testopstelling van een sensornetwerk uit te rollen in een of meerdere testcases.

HOOFDSTUK 2. SENSOREN EN SENSORBOXEN

2.1. DEFINITIES

In het overzichtsartikel van Karagulian et al. (2019) wordt een duidelijk onderscheid gemaakt tussen sensor en sensorbox. Hiervoor wordt onderstaande omschrijving gebruikt.

“For classification and understanding of sensor deployment, one should distinguish between the sole **sensor detectors** produced by original equipment manufacturers (hereafter such sensors are called OEM, or OEM sensors) and **sensor systems** (SSys), which include OEM sensors together with a protective box, sampling system, power system, electronic hardware, and software for data acquisition, analogue to digital conversion, data treatment, and data transfer. Hereafter, OEMs and SSys are referred to as low-cost sensors (LCS). From a user point of view, SSys are ready-to-use out of the box systems, while OEM users need to add hardware and software components for protection from meteorological conditions, data storage, data pushing, interoperability of data, and generally the calibration of LCS.”

→ **Sensor**

Sensor detector zoals verkocht door sensor leverancier.

→ **Sensorbox**

Geïntegreerd sensor systeem bestaand uit een sensor die in een beschermende box gemonteerd is en voorzien is van een pomp, stroomvoorziening, elektronica, software voor data collectie, data behandeling en data transfer.

SENSOR	SENSORBOX
Sensor detector	Geïntegreerd sensor systeem
Afkorting: OEM (sensor)	Afkorting: SSys
Voorbeelden:	Voorbeelden:



Om operationeel te zijn in een netwerk worden sensoren ingebouwd in sensorboxen. De sensorbox zorgt ervoor dat de sensor onder optimale omstandigheden kan meten, de verzamelde data behandeld kunnen worden en verstuurd.

Voor steden en gemeenten zijn geïntegreerde sensorboxen het meest interessant (conclusie stuurgroepmeeting) om een netwerk uit te bouwen omdat de benodigde functionaliteiten voor stroomvoorziening, data behandeling en transmissie aanwezig zijn. Echter, er is geen gestandaardiseerde opbouw van sensorboxen. Sensorboxen van verschillend merk of type maken gebruik van verschillende sensoren en technologieën voor stroomvoorziening en data behandeling. Als gevolg zijn bepaalde sensorboxen minder goed of beter geschikt voor bepaalde toepassingen. Om die keuze te kunnen maken op een gefundeerde manier wordt in dit rapport een overzicht gegeven van sensorboxen. Op basis van het voortraject van deze studie werd door steden en gemeenten de focus van dit overzicht afgebakend.

- **Doel:** opzetten luchtkwaliteitsmeetnetwerk, concrete cases verschillen van gemeente tot gemeente
- **Polluenten:** NO₂, O₃ en PM_{2,5}
- **Criteria:** specificaties, kwaliteit metingen, kostprijs.

Er werd een oplijsting gemaakt van sensorboxen (lijst_sensorboxen.xlsx) met daarin de naam van de sensorboxen. Via de naam van de sensorbox kan gelinkt worden met andere tabellen, met name een

overzicht van de specificaties van de sensorboxen, een overzicht van evaluatie van sensorboxen (kwaliteit) en een overzicht van de marktbevraging. Via de naam van de sensor(en) van een sensorbox kan gelinkt worden naar de specificaties van de sensor. Het is wel lang niet altijd duidelijk welke sensor in de sensorbox gebruikt wordt.

Sensorbox	
Identificator : naam	
<i>lijst_sensorboxen.xlsx</i>	

Overzicht specificaties sensorboxen	
Identificator : naam	
Specificaties	Zie 2.2
<i>specificaties_sensorboxen.xlsx</i>	

Overzicht specificaties sensoren	
Identificator : naam	
Specificaties	Zie 2.4
<i>specificaties_sensoren.xlsx</i>	

Overzicht evaluatie sensorboxen	
Identificator : naam	
Specificaties	Zie HOOFDSTUK 4
<i>evaluatie_sensorboxen.xlsx</i>	

Overzicht marktbevraging sensorboxen	
Identificator : naam	
Specificaties	Zie HOOFDSTUK 5 HOOFDSTUK 4
<i>marktbevraging_sensorboxen.xlsx</i>	

2.2. OVERZICHT SENSORBOXEN

Er werden in totaal 89 sensorboxen opgenomen in het overzicht (opgesteld in oktober 2019). Voor sommige sensorboxen zijn er verschillende modellen of versies beschikbaar. Deze zijn niet altijd afzonderlijk opgenomen in onderstaande tabel. In deze tabel zijn ook een aantal boxen voorindoortoepassingen opgenomen en zeer eenvoudige systemen. Bij de specificaties van de sensorboxen zal duidelijk worden welke voor outdoortoepassingen geschikt zijn en welke versies (indien meerdere versie) beschikbaar zijn. Ook zal opgenomen worden welke systemen nog extra randapparatuur (vb voor loggen van de data) nodig hebben.

naam	naam	naam
Aclima	Clarity Node	OPC-R1
Aeroqual AQY (AQY 1)	Climo	Origins – Laser Egg
Flow 2	Discmini	PATS+
Air Quality Egg 2018 Model	Dylos DC1100 series	pegasus AQ Urban
Air Quality Eggs	Dylos DC1700	Perkin Elmer – ELM
AirAssure	Dylos DC1700-PM	PMS-SYS-1
Airbeam	ECOMSMART	Pure Morning P3
Airbeam 2	Ecowitt WH41B	PurpleAir PA-I
Airbox	Edimax airbox	PurpleAir PA-I indoor
Airly	Elichens	PurpleAir PA-II
AirMatrix	EMMA	PurpleAir PA-II-SD
AirNut	E-mote system	RTI - MicroPEM
AIRQino	ES-642	SainSmart – Pure Monitoring P3
AirSenseEUR	ETL one	SY-DS-DK3
AirThinx IAQ	Foobot	SCI-608
AirVisual Pro	FRT AQM	Sensirion – SPS30 Eval Kit
Airviz Inc. - Speck	FRT RDM	SENTIENCE v3.0 Hawadawa
Ambiencedata	Hanvon-N1	Shinyei – PM Evaluation Kit
Apis	Intemo / Josene outdoor	SidePak AM520
AQMesh v.3.0	IQAir – AirVisual Pro	Spec Sensors
AQMesh v.4.0	Luftdaten	TSI - AirAssure
AQT-420	Magnasci SRL – uRADMonitor A3	TZOA
AQY (AQY 1)	Met One – E-Sampler	uHoo
AS-LUNG	Met One – PM Monitor	UNEP
Atal IAQ	Met One-831 (Aerocet 831)	Waspmote Plug & Sense!
Atmotrack	MetOne (NPM 2)	Watchtower 1
BAIRS	MicroAeth (black carbon)	Kunak Air A10 / P10
Bettair	MicroPEM	Praxis
Cair	Moji China - AirNut	uRAD INDUSTRIAL
Cairnet	Naneos - Partector	

Een overzicht werd als *lijst_sensorboxen.xlsx* toegevoegd aan dit rapport.

2.3. OVERZICHT SPECIFICATIES SENSORBOXEN

Een overzicht van de specificaties van de sensorboxen wordt gegeven in *specificaties_sensorboxen.xlsx* (digitale bijlage bij dit rapport).

De overzichtstabel bevat volgende velden:

	Naam	Naam van de sensorbox (type)
1	leverancier	Naam van de leverancier / producent
2	link	Webadres specificaties sensorbox
3	kostprijs	Kostprijs van 1 sensorbox
4	indoor / outdoor	Toepassing binnen of buiten
5	weersbestendig	Voorzien van weersbestendige behuizing, IP rating
6	PM sensor	Type stofsensor
7	merk	Merk stofsensor
8	PM fractie	Stoffractie, bv. PM2,5, PM10, TSP
9	eenheid	Eenheid waarin stofconcentratie wordt uitgedrukt, meestal $\mu\text{g}/\text{m}^3$
10	reports PNC	Registratie van de aantalconcentratie (particle number counts, PNC)
11	NO2 sensor	Type NO2 sensor
12	merk	Merk NO2 sensor
13	eenheid	Eenheid NO2 concentratie, bv. ppb of $\mu\text{g}/\text{m}^3$
14	range	Toepassingsgebied NO2 concentratie
15	O3 sensor	Type O3 sensor
16	merk	Merk O3 sensor
17	eenheid	Eenheid O3 concentratie, bv. ppb of $\mu\text{g}/\text{m}^3$
18	range	Toepassingsgebied O3 concentratie
19	meetfrequentie	Tijdresolutie, bv; 1 sec, 1 min, ...
20	rh range	Toepassingsgebied relatieve luchtvochtigheid
21	temp range	Toepassingsgebied temperatuur
22	bijkomende parameters	Bijkomende parameters buiten NO ₂ , O ₃ en PM
23	dimensies	Afmetingen van de sensorbox
24	gewicht	Gewicht van de sensorbox
25	factory calibrated	Is de sensorbox gecalibreerd: j/n
26	stroomvoorziening	Type stroomvoorziening, bv. netstroom, batterij
27	display	Weergave van de metingen op scherm van sensorbox: j/n
28	interne opslag	Data opslag in de sensorbox, bv. op miniSD
29	datacommunicatie	Technologie voor data communicatie
30	externe data opslag	Data opslag anders dan op de sensorbox zelf
31	visualisatie	Programma om data te bekijken

Gegevens die niet beschikbaar zijn worden als n/a weergegeven in de tabel. De tabel werd als *specificaties_sensorboxen.xlsx* toegevoegd aan dit rapport.

- Kolom 1 t/m 3: De naam, leverancier en link komen overeen met de informatie uit *lijst_sensorboxen.xlsx*.
- Kolom 4: De kostprijs geeft een indicatie (in USD of EUR) van de kostprijs per sensorbox. In de marktbevraging is extra informatie beschikbaar voor een selectie van sensorboxen (zie HOOFDSTUK 5).
- Kolom 5 en 6: De toepassing (indoor, outdoor of beide) en daarmee samenhangend de behuizing wordt gespecificeerd.
- Kolom 7 t/m 18: Specificaties van de PM, NO2 en O3 sensoren in de sensorbox.
- Kolom 19: Meetfrequentie.
- Kolom 20 en 21: Temperatuurs- en rv bereik waarbij metingen uitgevoerd worden.
- Kolom 22: Bijkomende sensoren om extra parameters te meten.
- Kolom 23 en 24: Afmetingen en gewicht van de sensorbox.
- Kolom 25: Zijn de data die de gebruiker te zien krijgt gecalibreerd?
- Kolom 26: Stroomvoorziening, mest courant netstroom, batterij, zonnepaneel.
- Kolom 27: Is er een display op de sensorbox waar status en metingen afgelezen kunnen worden? Dit is meestal niet het geval.
- Kolom 28 en 29: Wordt de data op de sensorbox opgeslagen (indien ja, meestal op SD kaart) en wordt de data doorgestuurd, volgens welk protocol (bekabeld (ethernet), draadloos (WIFI, GSM, LORA)).
- Kolom 30: Wordt de data extern opgeslagen, meestal als cloud opslag bij leverancier.
- Kolom 31: Kan de gebruiker de data visualiseren? Meestal gaat dit via een cloud-applicatie (webpage) of logger software waarmee de data die op de sensorbox opgeslagen worden uitgelezen en gevisualiseerd kunnen worden.

Een overzicht van de meest courante datacommunicatie technologieën werd opgemaakt door Johan Bergs (Imec)¹. Het document geeft een overzicht van de bedekkingsgraad, business model en technische informatie van WIFI en Low-Power Wide Area Network technologieën LoRaWAN, Sigfox en NB-IoT.

¹ IoT network comparison, Technical Report IDLab, toegevoegd in Bijlage A.

2.4. OVERZICHT SPECIFICATIES SENSOREN

In tabel *specificaties_sensoren.xlsx* wordt voor 92 sensoren (32 NO₂ sensoren, 20 O₃ sensoren en 40 PM sensoren) specificaties gegeven. De specificaties zijn opgedeeld in sensor kenmerken (type, meetprincipe, eenheid, meetfrequentie e.d.m.), de fysische sensorkenmerken (o.a. afmeting en gewicht), gebruikskenmerken (o.a. stroomvoorziening en montage) en de kostprijs.

	kolom nr	kolom hoofding
identificatie	1	naam
	2	leverancier
	3	polluent
sensor kenmerken	4	sensortype
	5	werkingsprincipe
	6	aanzuiging
	7	output signaal
	8	eenheid
	9	opmerking
	10	stabilisatieperiode
	11	meetfrequentie
	12	meetbereik
	13	deeltjesgrootte
	14	meetcondities
	15	sensitiviteit / resolutie
	16	detectielimiet
	17	responsijd
	18	accuraatheid
	19	kruisgevoeligheid
fysische kenmerken	20	afmetingen
	21	gewicht
	22	montage
gebruikskenmerken	23	levensduur/onderhoud
	24	drift
	25	stroomvoorziening
	26	verbruik
	27	datacomm
	28	montage
	29	uitleesbod
marktonderzoek	30	kostprijs

De belangrijkste sensorfabrikanten zijn (o.a.) Alphasense, Beijing Plantower, CitiTech, Euro-gas, Shinyei, Samyoung, Nova Fitness en Winsen.

HOOFDSTUK 3. SENSOR TEST PROTOCOLS EN INFRASTRUCTUUR

3.1. BELANGRIJKE INITIATIEVEN OP HET VLAK VAN SENSOR TESTEN EN INFRASTRUCTUUR

Hieronder geven we een samenvatting van enkele belangrijke initiatieven op het vlak van sensortesten waaraan een testprotocol en/of testprogramma gekoppeld is.

3.1.1. AQ-SPEC

Het **Air Quality Sensor Performance Evaluation Center (AQ-SPEC)** programma werd opgezet door South Coast AQMD (Air Quality Management District). Binnen dit programma werd een testkamer gebouwd, testprotocol opgesteld (voor labo en outdoor) en worden een uitgebreide range aan testen uitgevoerd. Doel is om een uitgebreide karakterisatie te doen van beschikbare sensoren en sensorsystemen.

<http://www.aqmd.gov/aq-spec>

Doelen zijn:

- Karakterisatie van commercieel beschikbare sensoren in labo en veld
- Richtlijnen geven en duidelijkheid te scheppen op het vak van sensortechnologie en data-interpretatie
- Succesvolle evolutie op het vlak van ontwikkeling en gebruik van sensortechnologieën te katalyseren

3.1.2. JRC TEST PROGRAMMA EN INFRASTRUCTUUR

In het kader van de studie “Metrology for Chemical Pollutants in Air (MACPoll)”, ondersteund door het EURAMET programma, werd door JRC, samen met onder andere MIKES (FI), INRIM (I) een testprogramma en labo-infrastructuur opgesteld. Meer info over het initiële testprotocol is te vinden in <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/protocol-evaluation-and-calibration-low-cost-gas-sensors-monitoring-air-pollution>.

Dit wordt nu gebruikt als basis voor het opstellen van een Europese norm voor testen en evalueren van gassensoren. Zowel voor testen van gassensoren als voor stofsensoren is een norm in voorbereiding (CEN WG 42). Het doel is om een uniform testprotocol te verkrijgen zodat evaluaties uniform zijn en de resultaten vergelijkbaar.

3.1.3. US-EPA

De US-EPA heeft een sensor programma opgezet. Hiermee willen ze meer inzicht krijgen in werking en performantie van sensoren door samen te werken met ontwikkelaars, sensor testen uit te voeren in labo en reële condities en samen te werken met partners om sensoren te testen in communities.

Resultaten van een aantal sensortesten en testprotocol zijn beschikbaar in onderstaande rapporten. Hierin staat ook het test protocol beschreven.

- Gassensoren: “Sensor Evaluation Report”, Williams et al., 2014.

https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NERL&dirEntryId=297517&simpleSearch=1&searchAll=EPA%2F600%2FR-14%2F464

- PM sensoren: “Evaluation of Field-deployed Low Cost PM Sensors”, Williams et al., 2014.
- VOC sensoren: “Next Generation Air Monitor (NGAM) VOC Sensor Evaluation Report”, Williams et al., 2015.
- Evaluation of Elm and Speck Sensors

Parameters die beoordeeld worden zijn: precisie (indien meerdere sensoren beschikbaar), lineariteit (R^2), invloed van T en RV, respons. Daarnaast werden ook user requirements beoordeeld zoals power requirements, data collectie/transmissie/opslag/recovery, data format, installatie en WIFI.

Een langdurige veldstudie van meer dan zes maanden voor een aantal sensoren werd uitgevoerd in 2015-2016 als onderdeel van het CAIRSENSE project (Feinberg et al., 2018). De sensoren waren in drievoud getest. De geteste sensoren waren Aeroqual SM-50 O₃, Cairpol CairClip NO₂+O₃ en PM sensoren TSI AirAssure, AirBeam, Dyllos DC1100, Alphasense OPC-N2, Shinyei PMS-SYS-1, AirViz Speck, TZOA PM Research.

Meer info over sensor-evaluaties is ook te vinden op

<https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/evaluation-emerging-air-pollution-sensor-performance>

Momenteel werken ze aan een update van het testprotocol “Draft Performance Parameters and Test Protocols for Ozone Air Sensors and Draft Performance Parameters and Test Protocols for Fine Particulate Matter Air Sensors”.

Meer info over sensoren en performantie van sensoren voor burgers en onderzoekers is te vinden op de website. Hierin staat algemene uitleg over sensoren en ook sensor-evaluaties.

<https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/>

Eerdere testen die door EPA zijn uitgevoerd, waren meestal korte-termijn studies van enkele weken of een paar maanden. Langdurige testen in verschillende meteorologische omstandigheden en condities zijn echter nodig om een beter inzicht te krijgen in de performantie en betrouwbaarheid bij verschillende omstandigheden en op lange termijn.

In juli 2019 is daarom een lange-termijn evaluatie van zes sensorboxen opgestart waarbij deze getest worden op zeven locaties die gekenmerkt zijn door verschil in klimatologische omstandigheden en concentraties. Verder info hierover wordt opgevolgd.

3.1.4. LCSQA (LABORATOIRE CENTRAL DE SURVEILLANCE DE LA QUALITÉ DE L’AIR)

Franse referentielab voor luchtkwaliteitsmetingen heeft een studie opgezet waarbij ze sensoren voor luchtkwaliteit testen onder reële condities ter hoogte van een stedelijk referentiestation. Ze hebben ook een evaluatieprotocol opgesteld. Doel van de studie was een groot aantal SSys en OEM sensoren te testen voor het meten van NO₂, O₃, PM_{2.5} en PM₁₀. Bij de studie waren 10 bedrijven en 5 labo's voor AQM betrokken en werden 23 sensoren- en sensorsystemen onderzocht. (Crunaire et al, 2019). De grootschalige vergelijking vond plaatst van januari – februari 2018. In het rapport zijn de sensoren echter anoniem getest. De resultaten van deze testen zijn wel opgenomen in Karagulian et al. 2019. Voor deze studie werden de codes van de systemen opgevraagd via L. Spinelle. Er werden 15 verschillende systemen geïdentificeerd waarvan er vier in duplo werden getest.

Verder is door LCQA een testprotocol/infrastructuur voor labotesten opgesteld voor NO₂ (Redon et al., 2017) en PM (Redon et al., 2018).

3.1.5. AirLAB

AirLab is een projectteam van Airparif. Airparif is een instantie geaccrediteerd door Het Ministerie van Milieu om de luchtkwaliteit in Parijs en de Ile de France regio te monitoren. Airparif baadt een continu meetsysteem uit om de luchtkwaliteit op te volgen en de gezondheids- en milieupact van luchtverontreiniging te beoordelen.

AirLab gebruikt een open innovatief model om samenwerking te stimuleren tussen partijen die inzetten op innovatie in het domein van de luchtkwaliteit. Het project van AirLab dat we willen opnemen in dit rapport is de “Microsensor Challenge”. De Microsensor Challenge is een onafhankelijke test waar sensorbox producenten kunnen op inschrijven met als doel om deze meetsystemen te vergelijken en eindgebruikers te helpen bij hun keuze tussen systemen. Er werd een editie in 2018 en 2019 georganiseerd.

De vergelijkende testen en rapportering wordt volgens een protocol uitgevoerd, zie 3.2.6. De testen zijn gedefinieerd voor verschillende categorieën, waar een categorie overeenkomt met de gebruikstoepassing van de sensorbox. Er wordt gewerkt met acht categorieën²:

1. Public or user Awareness for Fixed Outdoor locations (PAFO; French: SPAE): promote information and awareness of the public or users through outdoor air data. The requirements for this type of application are lower on the quality of the data. These Sensors aim only at coherence to reference devices and not at equivalence.
2. Public or user Awareness for Fixed Indoor locations (PAFI; French: SPAI): promote information and awareness of the public or users through indoor air data. The requirements for this type of application are lower on the quality of the data. These Sensors aim only at coherence to reference devices and not at equivalence.
3. Public or user Awareness for Mobile settings (PAM; French: SPM): promote information and public or user awareness with mobile data. The requirements for this type of application are lower on the quality of the data. These Sensors aim only at coherence to reference devices and not at equivalence. The use of a Sensor in “mobile settings” designates a sensor that can operate under movement and does not necessarily imply that it can be worn and/or transported by a human being.
4. Personal Awareness of Pollution (PAP; French: SPP): promote information and awareness of the individual. The requirements for this type of application are lower on the quality of the data. These Sensors aim only at coherence to reference devices and not at equivalence. Adequate sensors for this category need to be able to operate in motion while being worn over several hours by a human being.
5. Estimation of Personal Exposure (EPE; French: EEP): evaluate the impacts on human health of air pollution. The measurements used for this type of application must be quantitative and preferably have an equivalent to regulatory measures, while operating in motion and with a Sensor that can be worn over several hours by a human being.
6. Indoor Air Quality Control (IAQC; French: PAIB): controlling, managing, and regulating indoor air quality for building or installations with the help of a multi-parameter sensor. The requirements for this type of application are lower on the quality of the data. These Sensors

² http://www.airlab.solutions/sites/default/files/Protocole%20-%20Challenge_Microsensors%202018%20EN.pdf

aim only at coherence to reference devices and not at equivalence, while at the same time being continuously available and easily interoperable with the domotics system, including the managing or user interface.

7. Regulatory Compliance for Fixed Outdoor locations (RCFO; French: CRAE): verification of compliance to national or transnational standards of air quality for a given outdoor location. This implies very high requirements for the quality of data produced and their traceability to reference devices. The instruments used are certified on the basis of proof of measurement equivalence and their calibration follows nationally defined protocols to achieve standardized data quality objectives.
8. Regulatory Compliance for Fixed Indoor locations (RCFI; French: CRAI): verification of compliance to national air quality standards in childcare establishments under 6 years old (nurseries, day-care centers, etc.), kindergartens and elementary schools. This implies a high quality of data by meeting the accreditation requirements LAB REF30 or the specifications of the INERIS on this subject¹. The measurement process follows fully prescribed methods and best practices.

Een overzicht van de sensorboxen die opgenomen werden in de Microsensor Challenges van 2018 en 2019 in de outdoor categorieën zijn (Figuur 1):

2018

Sensibiliser à la qualité de l'air en extérieur			AIRLAB
marque	nom	étoile	
• ECOMESURE	ECOMSMART	★★★★★	
• RUBIX S&I	RUBIX WT1	★★★★★	
• ADDAIR	AQMesh	★★★★★	
• VAISALA SAS	AQT420	★★★★★	
• EYNIX	SenseInAir	★★★★★	
• Aeroqual Ltd	AQY 1	★★★★★	
• meo	blue by meo	★★★★★	
• Azimut-Monitoring	Greenbee	★★★★★	
• AGRISCOPE	PM-SCOPE	★★★★★	
• Clarity Movement Co.	Node-S	★★★★★	
• MANN + HUMMEL	OURAIR SPS208	★★★★★	
• IQAir AG	AirVisual Pro	★★★★★	

Surveiller la qualité de l'air extérieur			AIRLAB
marque	nom	étoile	
• RUBIX S&I	RUBIX WT1	★★★★★	
• EYNIX	SenseInAir	★★★★★	
• Aeroqual Ltd	AQY 1	★★★★★	
• ADDAIR	AQMesh	★★★★★	
• Environnement - Cairpol	Cairmet SPM	★★★★★	
• AGRISCOPE	PM-SCOPE	★★★★★	
• Clarity Movement Co.	Node-S	★★★★★	

2019

Outdoor Air – Monitoring (OA-M)

AIRLAB

brand	name	star-score
• 42 Factory	ATMOTRACK	★★★★☆
• LoThoSoft	AVC2	★★★★☆
• RUBIX S&I	WT1	★★★★☆
• SIM Engineering	SIM-MONI	★★★★☆
• ADDAIR	AQMesh	★★★★☆
• AGRISCOPE	PM-SCOPE	★★★★☆
• Airlabs	AIRNODE	★★★★☆
• Decentlab GmbH	Air Quality Station	★★★★☆
• Kunak Technologies	KUNAK AIR A-10	★★★★☆
• Pollutrack	Pollutrack	★★★★☆
• VAISALA SAS	AQT410	★★★★☆
• Airly	Airly	★★★★☆
• Clarity Movement Co.	Node-S	★★★★☆
• ECOMESURE	ECOMSMART	★★★★☆
• HabitatMap	AirBeam2	★★★★☆
• NanoSense	QAA-RE	★★★★☆

Outdoor Air – Awareness raising (OA-A)

AIRLAB

brand	name	star-score
• Azimut-Monitoring	Greenbee Secteur	★★★★☆
• Azimut-Monitoring	Greenbee Solaire	★★★★☆
• Clarity Movement Co.	Node-S	★★★★☆
• Decentlab GmbH	Air Quality Station	★★★★☆
• Pollutrack	Pollutrack	★★★★☆
• VAISALA SAS	AQT410	★★★★☆
• Airly	Airly	★★★★☆
• HabitatMap	AirBeam2	★★★★☆
• NanoSense	QAA-RE	★★★★☆

Figuur 1: Deelnemende sensorboxen aan de Microsensor Challenge georganiseerd door AirLab in 2018 en 2019.

3.1.6. VAQUUMS

In het Europese project VAQUUMS werden een aantal low-cost sensoren getest en geëvalueerd. Zowel in labotesten als veldtesten. Het project wordt door VMM gecoördineerd. Focus van het project ligt op 'low-cost' sensoren die eerder voor burgerwetenschappelijke gebruikt kunnen worden en kant-en-klare sensorboxen werden niet mee opgenomen in de beoordeling. Meer info over het project is te vinden op <https://vaquums.eu/>.

3.2. TEST PROTOCOLS

3.2.1. AQ-SPEC

Bij AQ-SPEC is de aanpak dat sensoren getest worden in veldtesten en indien de resultaten aanvaardbaar zijn, worden ze onderworpen aan labotesten. Dit omdat veldtesten steeds specifieke condities inhouden zowel in type locatie als tijdstip.

De parameters die bepaald worden zijn:

- Linearity: correlation (R^2) between co-located sensor and FRM/FEM concentration measurements
- Accuracy: degree of closeness of sensor concentration measurements to the actual concentration value measured using FRM/FEM instruments
- Precision: variation around the mean of repeated measurements of the same pollutant concentration
- Response time: how quickly does the sensor respond to changing conditions
- Co-pollutant interference: positive or negative measurement response caused by a pollutant other than the one being measured
- Temperature (T) and Relative Humidity (RH) influences: positive or negative measurement response caused by variations in ambient T and RH

Daarnaast wordt tijdens de veldtesten ook de data-recovery gerapporteerd.

Naast een gestandaardiseerd test protocol hebben ze ook een gestandaardiseerde manier om de resultaten te tonen in de vorm van powerpoint (field en lab evaluation) en een summary report waarin beide resultaten worden weergegeven.

AQ-SPEC
Air Quality Sensor Performance Evaluation Center

Sensor Description

Manufacturer/Model:
2B Technologies POM
(FEM EQA-0615-207)

Pollutant: Ozone

Linear Dynamic Range:
2 ppb - 10 ppm

Type: UV Absorption

Time Resolution:
10-second to 1-hour



Additional Information

Field evaluation report:
<http://www.aqmd.gov/aq-spec/evaluations/field>

Lab evaluation report:
<http://www.aqmd.gov/aq-spec/evaluations/labotest>

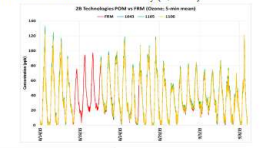
AQ-SPEC website:
<http://www.aqmd.gov/aq-spec>

Evaluation Summary

- Overall, the three POM units showed high accuracy, compared to the FRM ozone monitor, for a concentration range between 0 to 400 ppb.
- The three POM units exhibited high precision during almost all tested environmental conditions (ozone conc., T and RH). POM 1122 experienced some instability at 5 °C, 40% RH and 20 °C, 65% RH.
- The three POM units showed low intra-model variability (~13%), as well as good data recovery (> 90%).
- They have high correlation with the FRM instrument from both the field ($R^2 > 0.99$) and laboratory studies ($R^2 > 0.99$).

Field Evaluation Highlights

- Deployment period 07/20/2015- 09/09/2015: the three POM units followed the ozone concentration change as monitored by FRM instrument.
- POM 1043, 1105, and 1106 had 99%, 92%, and 91% data recovery, respectively.
- The units have low intra-model variability (+/- 10%).



Coefficient of Determination (R^2)

quantifies how the three sensors followed the ozone concentration change by FRM. An R^2 approaching the value of 1 reflects a near perfect agreement, whereas a value of 0 indicates a complete lack of correlation.

$R^2 > 0.99$

Laboratory Evaluation Highlights

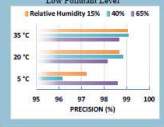
Accuracy $A(\%) = 100 - \frac{|R - R_i|}{R} \times 100$ Three brand new POMs were used in the lab testing

Steady State (s)	Sensor mean (ppb)	FRM (ppb)	Accuracy (%)
1	37.1	41.0	90.5
2	73.8	82.1	89.9
3	107.1	120.8	88.6
4	212.7	235.0	90.5
5	296.8	330.9	89.7

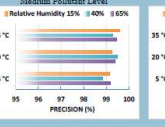
The higher the positive value (close to 100%), the higher the sensor's accuracy.

Precision

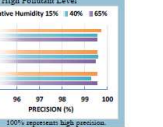
Low Pollutant Level



Medium Pollutant Level



High Pollutant Level

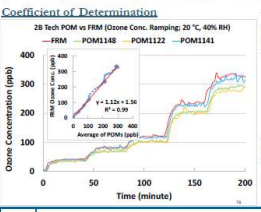


100% is superior high precision.

Sensor's ability of generating precise measurements of ozone concentration at low, medium, and high pollutant levels were evaluated under 9 combinations of T and RH, including extreme weather conditions like cold and humid (5 °C and 65%), hot and humid (35 °C and 65%), cold and dry (5 °C and 15%), and hot and dry (35 °C and 15%).

Coefficient of Determination

2B Tech POM vs FRM (Ozone Conc. Ramping: 20 °C, 40% RH)



Coefficient of Determination (R^2)

quantifies how the three sensors followed the ozone concentration change by FRM. An R^2 approaching the value of 1 reflects a near perfect agreement, whereas a value of 0 indicates a complete lack of correlation.

$R^2 > 0.99$

The three POM units showed excellent correlation with the corresponding FRM data ($R^2 > 0.99$) at 20 °C and 40% RH.

Climate Susceptibility (Coefficient of Determination R^2)

R^2	5 °C	20 °C	35 °C
15%	0.99	0.99	0.99
40%	0.99	0.99	0.99
65%	0.99	0.99	0.99

From the laboratory studies, temperature and humidity did not affect 2B POM's correlation with FRM instrument.

Observed Interferents

None.

All documents, reports, data, and other information provided in this document are for informational use only. Mention of trade names or commercial products does not constitute endorsement or recommendation. The South Coast AQMD's AQ-SPEC program, as a government agency, recommends the interested parties to make purchase decisions based on their application.

Figuur 2: Summary report gebruikt door AQ-SPEC om resultaten van veld- en labotesten samen te vatten

→ Veldtesten

Tijdens veldtesten worden sensoren vergeleken ten opzichte van FRM (Federal Reference Methods) en FEM (Federal Equivalent Methods).

Elke sensor wordt (in drievoud) naast de referentie-apparatuur geplaatst gedurende twee maanden (testperiode 30 tot 60 dagen) bij een van de twee stations die daarvoor voorzien zijn; met name: Riverside-Rubidoux (een site uit het EPA National Core Netwerk met hoge concentraties, neighborhood monitoring, trend analyse en reporting) en een straatstation (naast snelweg) van het EPA national near-road monitoring network.

Volgende aanpak wordt hierbij toegepast:

- Sensoren worden off-the-shelf getest, zonder voorafgaande kalibratie
- Gebruikt volgens instructies van fabrikant
- Sensoren met weersbestendige behuizing worden bevestigd aan protective railing en sensoren zonder behuizing worden geplaatst in een sensor shelter
- Voor de evaluatie wordt een validatie toegepast volgens basis QA/QC procedures (weglaten van outliers, negatieve waarden en ongeldige waarden). Geldige waarden worden dan verder uitgemiddeld (5 min, 1h en 24h)

Parameters die geëvalueerd worden zijn:

- Intra-model variability
Via descriptieve statistics: gemiddelde, mediaan, standard deviatie
- Lineaire correlatie (R^2) ten opzichte van referentie
 R^2 en regressie (helling en intercept) ; hiervoor is een excell spreadsheet gemaakt
- Data-recovery
Berekend uit verhouding geldige datapunten ten opzichte van beschikbare datapunten tijdens de testperiode

Overzicht van evaluatierapport (in de vorm van presentaties):

In de evaluatie-rapporten worden figuren getoond met gemiddeld (en standaard afwijking), mediaan en % afwijking (inter-model variability) weergegeven op basis van 5-min waarden.

Voor de vergelijking met referentie worden correlatieplots (R^2 , helling en intercept) getoond voor 5-min, 1h en 24h gemiddelden. In bepaalde gevallen worden ook niet-lineaire regressie gefit.

Verder wordt ook data-recovery (in %) weergegeven.

Voor PM worden vergelijking met twee verschillende FRM en FEM weergegeven

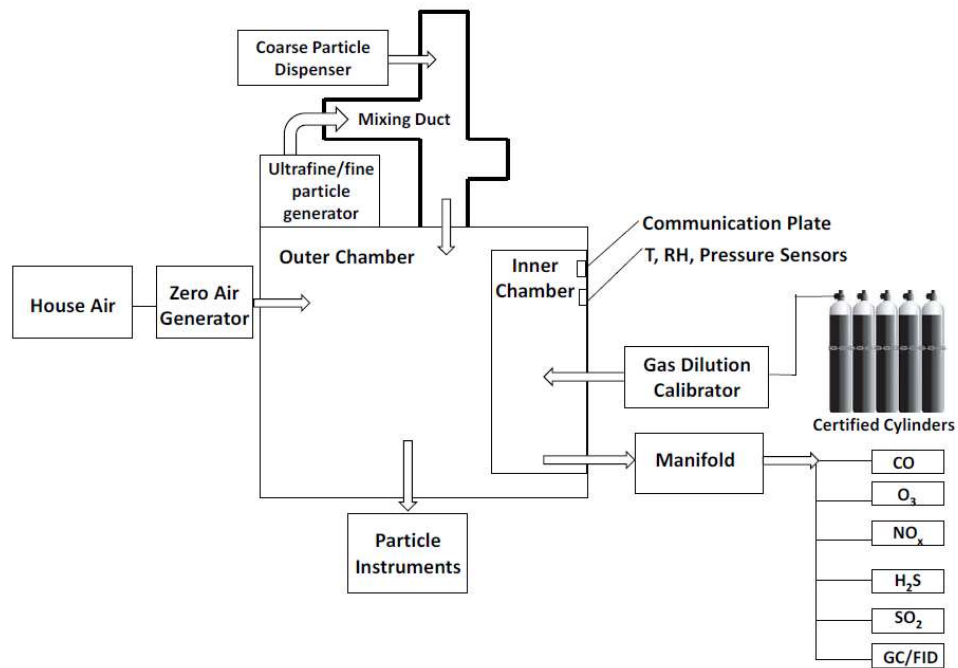
→ Labotesten

Test kamer en infrastructuur

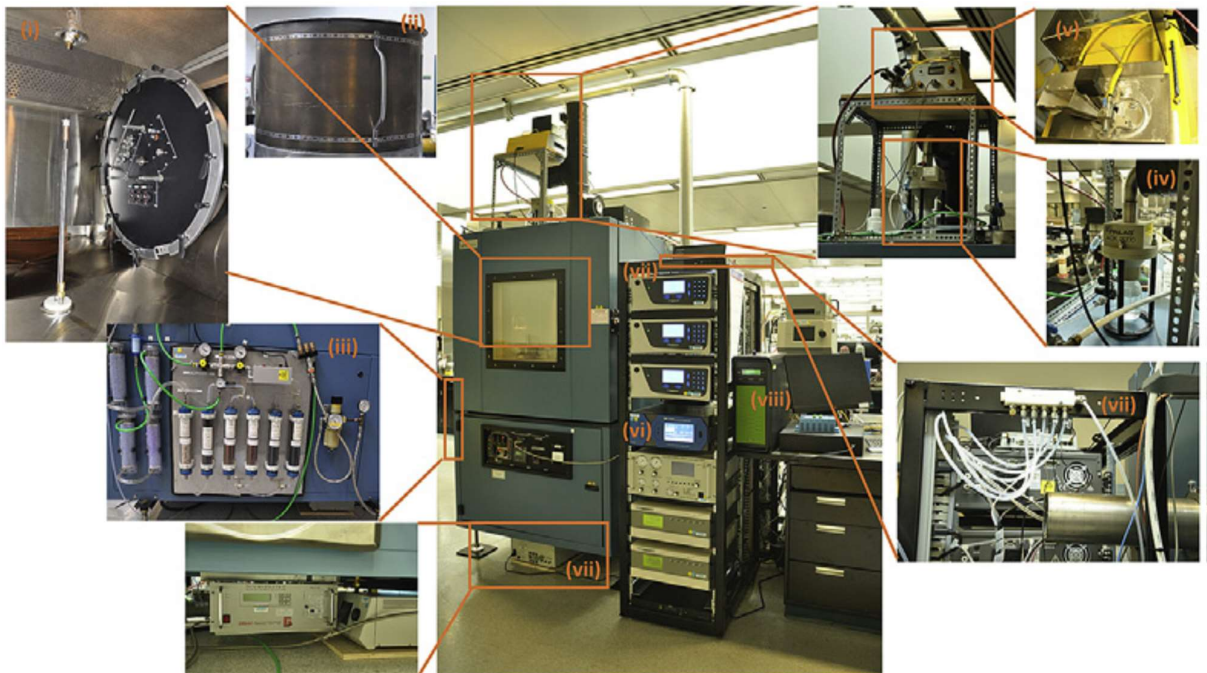
Voor de labotesten werd een testkamer ontwikkeld met bijhorende gas- en stofgeneratieapparatuur en referentiemonitoren. Figuur 3 geeft een schematische voorstelling van de testkamer en geeft een afbeelding van de verschillende onderdelen.

De testinfrastructuur bestaat uit:

- Een professionele environmental test kamer om variabele en stabiele RH en T condities te genereren
- Een cilindrische constructie (inner chamber) voor testen van gassensoren
- Generatiesysteem voor zero-lucht
- Twee deeltjesgeneratiesystemen PALAS (model AGK200) en TOPAS (model SAG 410/U)
- Een dynamische verdunningseenheid
- Referentietoestellen
- Computersoftware voor instellen en controleren van experimentele parameters



Figuur 3: Schematische voorstelling van de AQ-SPEC test kamer



Figuur 4: Afbeelding van de verschillende onderdelen van de AQ-SPEC test infrastructuur

Test protocol

Typische setpoint zijn weergegeven in onderstaande tabel. Voor NO₂ komt 'Low' overeen met jaargemiddelde NAAQS (National Ambient Air Quality Standards), 'Medium' en 'High' met respectievelijk 50% en minstens 100% hoger dan deze waarde. Very Low en Very high komen respectievelijk overeen met een waarde ver onder en boven deze standaarden ofwel in de buurt van min en max te genereren of meetbare concentratie met referentiemonitoren.

Tabel 1: Typische concentraties gebruikt bij labotesten in AQ-SPEC

Pollutant / Level	PM (µg/m ³)	CO (ppm)	O ₃ (ppb)	NO ₂ (ppb)	SO ₂ (ppb)
Very Low	10	1	30	30	30
Low	15	4	50	50	50
Medium	50	7	90	70	70
High	150	15	150	100	150
Very High	300	20	250	200	300

Een experiment bestaat typisch uit twee fasen:

- een concentratiestapfunctie voor de bepaling van de lineaire correlatiecoëfficiënt (met zero en 5 bovenstaande concentraties) met een tijdsduur van elke stap van ongeveer 40 min
- steady state fase voor de evaluatie van de andere parameters

de parameters die geëvalueerd worden zijn:

- Intra-model variabiliteit.
Berekend als % uit verschil van hoogste en laagste gemiddelde concentratie, gedeeld door gemiddelde. Deze moet <20%
$$\text{Intra-model variability (\%)} = 100 \times (S\text{Mean}_{\text{highest}} - S\text{Mean}_{\text{Lowest}}) / S\text{Mean}_{\text{average}}$$
- Accuraatheid.
berekend als verschil van concentratie (gemiddelde van de drie) over de meetperiode met referentie ten opzichte van referentie. Dit wordt voor elke concentratie apart berekend. Hoe dichter de waarde bij 100%, hoe accurater. Wanneer de concentratie van de sensor meer dan 100% afwijkt is de accuraatheid negatief
$$A (\%) = 100 - 100 \times |S\text{Mean}_{\text{Average}} - R\text{Mean}| / R\text{Mean}_{\text{average}}$$
- Precisie
Berekend als standard error van de drie sensoren ten opzichte van de gemiddelde waarde over de totale periode; Dit gebeurt op basis van een periode van 20 min
$$P (\%) = 100 - 100 \times SE_{\text{Sensor}} / S\text{Mean}_{\text{Average}}$$

Met SE_{Sensor} standaard afwijking van de gemiddelde waarde van de drie sensoren per aparte tijdseenheid ten opzichte van de gemiddelde over de ganse periode
- Detectielimiet
$$\text{LOD} = 3,3 \sigma / S$$

Met S de helling van de lineaire regressie en σ de standaarddeviatie van de regressielijn tussen referentiemeting en gemiddelde van de sensoren
- Lineariteit: correlatie (R^2), helling en intercept ten opzichte van referentie.

- Interferenties voor meteorologische condities bij verschillende T (5 -20 – 35 °C) en RH (15 – 40 – 65%). Hiervoor worden R^2 waarden van elk van deze experimenten vergeleken en verondersteld dat een kleinere R^2 wijst op een invloed van T of RH variatie op sensoroutput
- Data recovery: zie veldtesten

Alle parameters worden berekend uit gemiddelde van de drie sensoren op voorwaarde dat de inter-sensor variabiliteit <20%. Indien dit niet het geval is worden de drie sensoren apart behandeld in de verdere evaluatie.

Andere parameters die enkel kwalitatief beoordeeld worden zijn:

- Sensordegradatie: verminderde performantie door sensorveroudering of vervuiling: aantasting van de sensor
- Baseline sensor drift. Verschil in respons bij zero of standaard concentratie. Indien dit wordt vastgesteld wordt leverancier gecontacteerd en probleem verholpen of worden data zo opgenomen en probleem gemeld in rapport
- Sensor respons ten gevolge van stroomonderbreking: soms kan het een tijdje duren vooraleer een sensor weer goed meet nadat stroom is uitgevallen. Dit is een belangrijke parameter om continuïteit van data te verzekeren

Interferenties die getest worden zijn weergegeven in onderstaande tabel;

Tabel 2: Tabel met interferenties per type sensor (bron Polidori et al., 2016)

Pollutant	Analyzer type	H ₂ S	SO ₂	NO ₂	NO	CO ₂	O ₃	Water vapor	CO
SO ₂	Ultraviolet Fluorescent	0.1	³ 0.14	0.5	0.5		0.5	20,000	
SO ₂	Flame Photometric	0.01	³ 0.14			750		² 20,000	50
SO ₂	Gas Chromatography	0.1	³ 0.14			750		² 20,000	50
SO ₂	Electrochemical	0.1	³ 0.14	0.5	0.5		0.5	² 20,000	
SO ₂	Conductivity		³ 0.14	0.5		750			
O ₃	Chemiluminescent	² 0.1				750	³ 0.08	² 20,000	
O ₃	Electrochemical		0.5	0.5			³ 0.08		
CO	Non-dispersive Infrared					750		20,000	³ 10
CO	Electrochemical				0.5			20,000	³ 10
CO	IR Fluorescent					750		20,000	³ 10
NO ₂	Chemiluminescent		0.5	³ 0.1	0.5			20,000	
NO ₂	Electrochemical		0.5	³ 0.1	0.5	750	0.5	20,000	50

¹Concentrations of interferent listed must be prepared and controlled to $\pm 10\%$ of the stated value

²Do not mix with the pollutant.

³Concentration of pollutant used for test. These pollutant concentrations must be prepared to $\pm 10\%$ of the stated value.

Rapportering

In het short evaluation report wordt het volgende weergegeven:

- Accuracy per gemeten concentratie
- Precisie (%) (per combinatie van T en RV: 9 in totaal)
- R^2 tov referentie (per combinatie van T en RV: 9 in totaal)
- Correlatieplot tov referentie (met regressielijn)

3.2.2. JRC

Het protocol dat door JRC initieel werd opgesteld in MacPoll is weergegeven in het rapport: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC83791>.

Dit protocol heeft als basis gediend voor het EU protocol en wordt hieronder besproken.

3.2.3. CEN/TC264/WG42

Dit protocol is in voorbereiding en heeft als doel een gestandaardiseerde werkwijze vast te leggen voor het testen en beoogde datakwaliteitsvereisten vast te leggen. In functie van de kwaliteit worden drie verschillende klassen vastgelegd. Het testprotocol omvat zowel labo als veldtesten. Omdat gassensoren en stofsensoren een andere aanpak vereisen worden twee verschillende documenten opgesteld. Het protocol voor gassensoren is het verst gevorderd en zal eind december 2020 worden ingediend voor goedkeuring en review. Het protocol voor stofsensoren is nog in preliminair stadium.

Het **protocol** (stand van zaken maart 2020) voor gassensoren schrijft labo en veldtesten voor op basis van volgende testen

- Pre-labtest waarbij responstijd, lineariteit en herhaalbaarheid van sensor getest wordt
- Uitgebreide labotest (*optioneel) waarbij invloed van T, RV, interfererende componenten, drift worden onderzocht
- Veldtesten bij referentiemeetstations gedurende 40 dagen in winter en zomer waarbij het aantal meetstations waarop sensoren geëvalueerd worden af hangt van het feit of uitgebreide labotest al dan niet werd uitgevoerd. Wanneer de uitgebreide labotests niet werden uitgevoerd moet het aantal referentiestation ongeveer dubbel zo veel zijn als zonder deze uitgebreide veldtesten. Dit om zeker te zijn dat de sensoren onder voldoende verschillende condities getest zijn die overeenkomen met de toekomstige toepassing.

Zowel het aantal sensorsystemen dat getest moet worden als de testcondities (o.a. concentraties en testcondities in lab en type referentiestationen waarbij de co-locatie moet plaatsvinden en het seizoen waarin dit moet gebeuren) en de lengte van de testperiode worden vastgelegd.

Tabel 3: Test concentraties voor labotesten

polluent	Test concentraties ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
NO ₂	0, 40, 100, 140, 200
O ₃	0, 60, 120, 180, 240
NO	0, 40, 100, 250, 400

SO ₂	0, 75, 125, 200
Benzeen	0, 2, 5, 10
CO	0, 2, 7, 10

De **labelling** van de systemen op basis van de evaluatiecriteria is gebaseerd op de DQO (dataquality objectives) van Directive 2008/50/EC voor 'indicative measurements and 'objective estimations'.

Op basis hiervan werden drie klassen voor sensoren vastgelegd:

- Class A: deze voldoen aan DQO van Indicative measurements; Voor indicative measurements kunnen ook bepaalde passieve samplers gebruikt worden
- Class B: deze voldoen aan DQO van Objective estimations
- Class C: deze hebben een iets relaxtere DQO dan voorgaande klassen maar zijn opgenomen om sensoren die nog bruikbaar kunnen zijn voor vb citizen science of sensibilisering te onderscheiden van sensorsystemen die waardeloos zijn.
- Ook voor systemen die niet voldoen aan een van deze criteria, wordt een testrapport op basis van de pre-labotesten opgesteld zodat het potentieel ervan voor minder kritische toepassingen kan beoordeeld worden

De **evaluatiecriteria** zijn gebaseerd op de DQO en worden berekend als maximum expanded uncertainty voor verschillende concentratieniveau's (LV: Limit Value, U/LAT: Upper/Lower Assessment Threshold, AT: Alert Threshold en CL: Critical Level) van toepassing voor de respectievelijke pollutent. De toegestane % afwijking per pollutent en voor de verschillende klassen in weergegeven in onderstaande tabel.

Een voorbeeld: Voor NO₂ bedraagt de uurgemiddelde LV 200 µg/m³. Voor een klasse A sensor systeem mag de expanded uncertainty dan niet meer dan 50 µg/m³ bedragen bij deze meetwaarde. De berekeningswijze voor expanded uncertainty is niet eenvoudig en is beschreven in het protocol.

Tabel 4: DQO (Data Quality Objectives) weergegeven als % expanded uncertainty voor gassensoren en stofsensoren

polluent	Class A	Class B	Class C
NO ₂	25%	75%	200%
O ₃	30%	75%	200%
NO _x	25%	75%	200%
SO ₂	25%	75%	200%
Benzeen	30%	100%	200%
CO	25%	75%	200%
PM ₁₀ , PM _{2.5}	50%	100%	>100% (tbd)

Sensor performance criteria die worden meegenomen voor het berekenen van de standard expanded uncertainty om de DQO te toetsen voor de (uitgebreide) labotesten zijn:

- Standaard onzekerheid voor lineariteit
- Lange termijn drift
- Effect van temperatuur
- Effect van RH
- Memory effecten van test gas, T en RH

Voor de veldtesten wordt de standard expanded uncertainty om de DQO te toetsen berekend op basis van de regressielijn (helling, intercept) van sensordata ten opzichte van referentiedata.

Er zijn nog een aantal aparte sensor performantie criteria per test vastgelegd in het protocol. Ter illustratie zijn de requirements voor Class A systemen en de waarden van toepassing voor NO₂ weergegeven in onderstaande tabel. De Responstijd, lineariteit en herhaalbaarheid worden bepaald in pre-labotesten, de between sampler uncertainty (precisie) en data capture worden afgeleid uit de veldtesten.

Tabel 5: Sensor performance requirements per test

criteria	Class A
Respons tijd	$t_{90}^* < 1/10$ van de uitmiddelingsstijd (typisch 1 h)
Lineariteit	$U(\text{lof})^{**} < 8\%$ van UAT (vb voor NO ₂ (uur) = 11 µg/m ³)
Repeatability (r), LOD	$r \leq 7,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $\text{LOD} \leq 19,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Between sensor system uncertainty	$u(\text{bs},s)^{***} \leq 7,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Minimum data capture	For hourly values: 90%

* t_{90} : dit is de tijd die de sensor nodig heeft om 90% van de meetwaarde te bereiken bij een plotse concentratiestijging van 0 naar een hoge concentratie die wordt aangeboden

** $U(\text{lof})$: standaard onzekerheid voor lineariteit

*** $u(\text{bs},s)$: between sensor standard uncertainty

Telkens moeten de sensorsystemen in drievoud getest worden en ze moeten alle drie voldoen aan kwaliteitscriteria. Verder wordt ook beschreven wat er moet gebeuren indien fabricanten wijzigingen aanbrengen o.a. aan berekeningswijze, ...

Het protocol voor stofsensoren zal gebaseerd zijn op het protocol voor stofsensoren. Het verschil is dat geen labotesten voorzien zijn omdat maar een beperkt aantal labo's deze kunnen aanbieden.

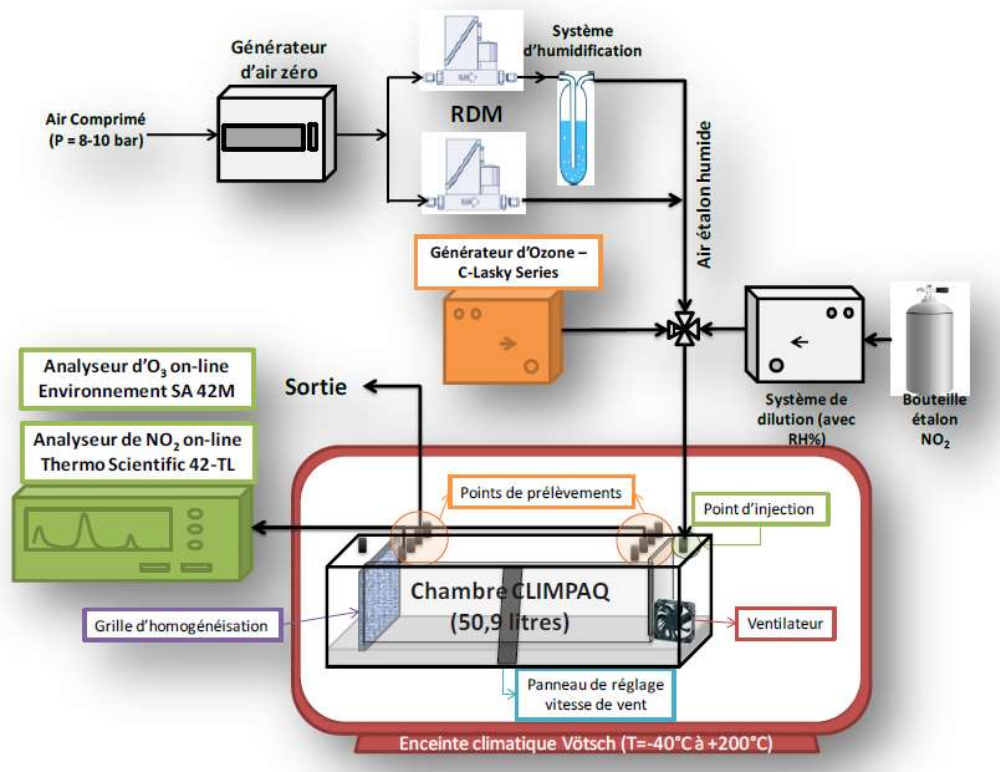
3.2.4. LCSQA

LCSQA heeft een labo- en veldtestprotocol opgesteld.

→ Labotesten

Bij LCSQA gebruiken ze verschillende blootstellingskamers om gassensortesten uit te voeren: kamer van 1 en 6L, blootstellingkamer van 36 L en Climpaq kamer van 51 L. Deze laatste kunnen ze in een klimaatkamer (Vötsch) plaatsen om T en RH te regelen. Hieronder wordt test-set-up van deze laatste getoond (Redon et al., 2017).

Voor stofsensoren hebben ze stofgeneratie vanuit droge (o.a. Arizona Dust) en vanuit oplossing (zoutoplossing) en blootstellingkamer (36 L). Als referentie gebruiken ze een TEOM.



Figuur 5: Test set-up voor testen van gassensoren gebruikt door LCSQA

Parameters die gemeten worden bij de labotesten zijn:

- Responstijd (opwarmtijd voor zero lucht, t_{90} en t_{10})
- Kalibratiefunctie
 - Sensibiliteit: respons van sensor in functie van concentratie
 - Helling en intercept
 - Detectielimiet (gemeten bij zero en concentratie?): detectielimiet is dan 3 keer ruis σ
 - Kwantificatielimiet: gedefinieerd als 10 keer de ruis.
- Meetfout
 - Herhaalbaarheid (repeatability)
 - Reproduceerbaarheid (repeatability)
- Drift
 - Korte-termijn (1 week), middellange-termijn (1 maand) en lange-termijn (6 maand)
- Interferenties:
 - Temperatuur (-10 – 40°C), RH (20, 50, 80%), windsnelheid
 - Gassen
 - Electromagnetische golven, lichtgolven, acoustische vibratie

Voor PM is er nog geen testprotocol maar werd in een eerste verkennende studie al wel sensoren getest en regressielijn opgesteld (ten opzichte van referentie of equivalent toestel) waarbij R^2 , helling en intercept werden afgeleid (Redon et al., 2018).

→ **Veldtesten**

In de 1^{ste} nationale vergelijking van sensoren voor luchtkwaliteit³ werd het referentie station van LCSQA/IMT Lille Douai gebruikt in stedelijke omgeving nabij verkeer. De sensoren werden op het dak van de meetcabine geplaatst. Sensorboxen die niet bestemd waren voor buitenopstelling werden in een glazen blootstellingskamer gestoken (50L) die op het dak van de cabine geplaatst werd. Er werd lucht door de blootstellingskamer gepompt bij constant debiet van 13 L/min.

Er werden referentie en equivalente toestellen ingezet voor ozon, NO, NO₂, NO_x, PM_{2,5} en PM₁₀ met een tijdsresolutie van minuut tot uurlijkse waarden.

Sensoren die tijdens veldtesten werden geëvalueerd (zie ook Figuur 12):

Een component systemen:

- Airmatrix
- Airbeam
- OPC-N2
- Clarity node
- NPM 2 (Met One) (deze zijn eigenlijk eerder mini-monitoren (met pomp))
- ES-642 (Met One) (deze zijn eigenlijk eerder mini-monitoren (met pomp))
- Atmotrack
- NO2 Cairclip (mobile)
- O3 aeroqual (mobile, indoor) -> er bestaat ook een outdoor versie (AQY en niet te verwarren met minimeetstation AQS)

Multi-component systemen:

- EcoSmart (Ecomesure)
- AQT420 (Vaisalla)
- Watchtower 1 (Rubix Sense & Instrumentation)
- Cairnet (Cairpol-Environment)
- AQMesh (Environmental Instruments)

DIY systemen:

- Waspote Plug&sense (libellium)
- AirSensEUR

Al deze sensortesten werden opgenomen in review van JRC (zie 4.1). De sensoren en boxen zijn ook opgenomen in de literatuurstudie. Soms is het onderscheid tussen sensoren en boxen anders. In de overzichtsstudie van JRC en in onze studie spreken we van sensoren als er geen uitlezing is en behuizing. In de studie van LCSQA maakt men onderscheid tussen systemen die 1 component meten en multi-component systemen.

3.2.5. US-EPA

Door de US-EPA worden ook veld- en labotesten uitgevoerd.

³ Crunaire, S., Redon, N., Spinelle, L., 2018. 1er Essai national d'aptitude des micro-capteurs pour la surveillance de la qualite de l'air.

Labotesten worden uitgevoerd in het labo van NERL (National Exposure Reference Lab) (zie Williams et al., 2014). Sensortesten werden uitgevoerd in een glazen testkamer. Gasmengsels werden aangemaakt aan de hand van een programmeerbaar gasmengsysteem (Teledyne API Model T700U) op basis van eigen gasstandaarden (SO_2 , NO_2) of een generatieeenheid (O_3). Verdunningslucht (gezuiverd voor PM, vocht en KWS) werd gebruikt om de juiste concentraties aan te maken. Referentiemonitoren werden gebruikt voor NO_2 (Thermo Model 42C), O_3 (2B Model 205) en SO_2 (Thermo Model 43C). T en RV konden gevarieerd worden van 5-45 °C en 20 – bijna 100%.

Parameters die beoordeeld worden zijn: precisie, lineariteit (R^2), invloed van T en RV, invloed van interfererende pollutanten, detectielimiet (LDL), resolutie, responstijd.

Op basis van evaluatie van de testprogramma's werden volgende parameters als meest geschikt bevonden voor beoordelen van sensoren: R^2 (uit correlatie met referentiemeting), effect van T en RV, gebruiksgemak, databeschikbaarheid (uptime of sensor), mobiel karakter.

Voor veldtesten worden vaak shelters gebruikt om de sensoren in of onder te plaatsten. Onderstaande figuur toont een shelter die gebruikt werd voor testen van stofsensoren (Williams et al., 2014).



Figuur 6: Shelter voor veldtesten van stofsensoren en veldtesten van stof en andere sensoren

De EPA heeft een instruction guide opgesteld met aanbevelingen voor sensor-evaluatie en een MAT (Macro Analysis Tool), een rekenblad om vergelijking te berekenen. Deze instruction guide is vooral gericht op citizen science initiatieven en geven advies hoe sensordata met referentiedata kunnen vergeleken worden.

3.2.6. AIRLAB

Om testen te kunnen voorzien voor alle acht categorieën (zie 3.1.5) te voorzien is er een outdoor, indoor en mobiele testsite.

De outdoor testsite is een meetstation dat onderdeel is van het referentienetwerk (Boulevard Périphérique Est, BP-Est). Bij oostenwind is dit een verkeersstation, bij westenwind een stedelijk achtergrondstation. Daardoor komt een groot bereik aan luchtverontreiniging voor op die plaats. De categorieën die hier getest worden zijn:

- Public or user Awareness for Fixed Outdoor locations (PAFO)
- Regulatory Compliance for Fixed Outdoor locations (RCFO).

Op deze locatie zijn referentiemonitoren beschikbaar voor PM₁₀, PM_{2,5}, NO₂, NO en O₃. De uurgemiddelden worden gebruikt in de colocatietesten. De duur van de vergelijkende metingen is min. 14 dagen.

De evaluatie wordt uitgevoerd door accuraatheid, toepasselijkheid, draagbaarheid, ergonomie en kostprijs criteria te combineren in een geïntegreerde index (volgens systeem van Fishbain et al., 2017, zie 6.1). Bij de integratie wordt een weging toegepast die varieert voor de toepassingscategorieën (sommige criteria zijn irrelevant voor een bepaalde categorie en worden niet meegenomen, gewicht = 0). De eindscore wordt herschaald tussen 0 en 5 en als score als sterren voorgesteld. De resultaten worden gepubliceerd op de AirLab website.

De voorstellingswijze is erop gericht om scores op de verschillende criteria visueel te kunnen beoordelen. Men kan nagaan op welk criterium goed of slecht gescoord wordt. De kwantitatieve gegevens (bijvoorbeeld correlatie) worden niet weergegeven, met uitzondering van de kostprijs. Voor accuraatheid is deze voorstellingswijze misschien wat te beperkt, cijfermateriaal ontbreekt en de interpretatie van een geïntegreerde index is ook niet eenvoudig. Het laat langs de andere kant wel toe om te vergelijken tussen verschillende systemen.

AirLab voorziet geen labo testen.

3.2.7. VAQUUMS

In het VAQUUMS project, dat in Vlaanderen uitgevoerd werd door de VMM, werden sensoren getest voor PM, O₃ en NO₂. In de testen lag de focus op (low-cost) sensoren, eerder dan op sensorboxen. Een overzicht van de sensoren die getest werden is gegeven in Figuur 7.

Sensors selected for VAQUUMS-tests

PM	NO ₂	O ₃
• Alphasense OPC-N2 • Dylos DC1700 • Honeywell HPMA115S0 • Nova fitness SDS011 • Plantower PMS 7003 • Shinyei PPD42NJ • Shinyei PPD60PV-T2 • Winsen ZH03B	• Alphasense NO2-B43F • Citytech NO2 3E50 • Envea Cairclip NO2 • Membrapor NO2/C-1 • Membrapor NO2/C-20	• Alphasense OX-B431 • Citytech O3 3E1F • Envea Cairclip O3/NO2 • Aeroqual SM50 • Membrapor O3/C-5

Figuur 7: Sensor selectie voor VAQUUMS-testen.

De labo en veldtesten werden uitgevoerd volgens een protocol, zie https://vaquums.eu/deliverables/life-vaquums-test-protocol_final.pdf/view. In het labo werden gassen en PM tests uitgevoerd, en op een referentiestation (Borgerhout, Antwerpen) werden veldtesten uitgevoerd. Resultaten zijn beschikbaar in factsheets per sensor.

3.3. SENSORNETWORK PILOT STUDIES IN EUROPESE STEDEN

In een aantal Europese steden worden (vaak in samenwerking met onderzoeksinstituten) worden pilootprojecten opgezet. Het is belangrijk deze op te volgen en ervaringen uit te wisselen. Enkele voorbeelden:

- In Londen is het project **breathLondon** uitgerold waarbij op 100 plaatsen sensorboxen van type AQMesh geïnstalleerd worden, aangevuld met mobiele metingen (Google car met referentiemonitoren) en persoonlijke metingen
- In Oslo wordt door NILU een project opgestart **iFLINK** waarbij samen met andere onderzoeksgroepen en ook in andere steden (Bergen, Bærum, Drammen, Kristiansand) een sensornetwerk wordt uitgerold met (o.a. airSensEUR sensorboxen).
- In Parijs heeft AirParif ook plannen om sensorboxen in te zetten (stationair en mobiel)
- In de Balearen (Spanje) is in de haven van Palma een netwerk van Kunak sensoren uitgerold (aantal niet gekend)

HOOFDSTUK 4. KWALITEIT SENSOR METINGEN

4.1. OVERZICHTSARTIKEL

Het JRC publiceerde een uitgebreid wetenschappelijk artikel over testresultaten van sensoren en sensorboxen voor luchtkwaliteitsmetingen:

Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring

By authors from JRC, INERIS, LCSQA and IMT Lille

Augustus 2019

Karagolian et al., 2019. Atmosphere, 10, 506, 1-41.

Tijdens de stuurgroepvergadering werd de inhoud van het artikel besproken. De belangrijkste zaken worden hieronder besproken.

→ Uitgangspunt

- Erkennen potentieel van deze systemen
- Interesse voor gebruik (al dan niet supplementair)
- Maar... gebrek aan uitgebreide en beschikbare info over kwaliteit van deze systemen en de grote aantallen verschillende systemen maken selectie van meest geschikte systeem moeilijk

→ Classificatie

- Onderscheid tussen OEM sensors en SSys (zie sectie 2.1)
 - OEM sensors: sensoren (detectors) geproduceerd door originele sensor producenten (SENSOR); *onderdeel dat de meting doet*
 - SSys: integratie van OEM sensoren in een (weersbestendige) behuizing, sampling system, stroomvoorziening, electronica, software om data te bekomen in juiste eenheid, en deze te transfereren (SENSORBOX)

→ Kwaliteitsevaluatie

- Momenteel bestaat er geen universeel testprotocol om sensoren en sensorboxen te testen t.o.v. referentiemetingen.
 - Protocol in ontwikkeling op Europees niveau: EU CEN/TC264/WG42
- Protocol ontwikkeld door **AQ-SPEC** (South Coast AQMD)
 - uniforme aanpak op vlak van opzet en evaluatie: veld -> labo
 - reeds veel sensor(boxen) getest
 - zeer waardevolle info oww vergelijkbaarheid
- Spinelle et al. 2013; op basis hiervan is nieuw EU protocol gebaseerd
- LCSQA (Redon et al., 2017)
- US-EPA: test protocol
- Enkele bedenkingen:
 - Condities waaronder testen zijn uitgevoerd:

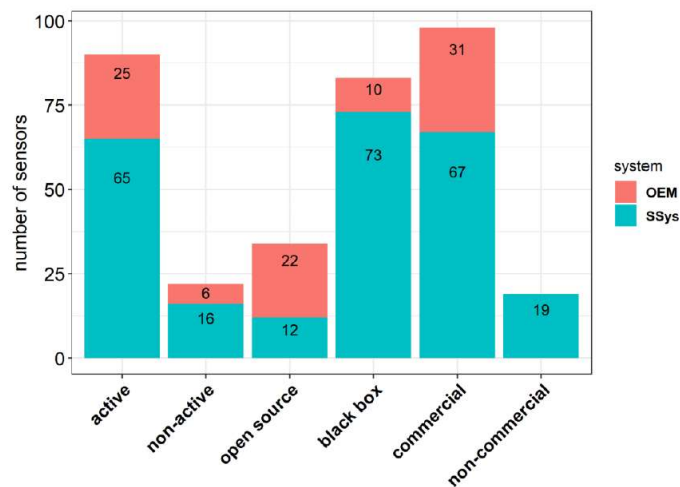
- Concentratierange heeft invloed op R^2
 - Meteorologische condities zijn belangrijk
 - Tijdsbasis waarop vergelijking gebeurd is, heeft invloed op resultaat
- Gebruikte kalibratiemodel
 - Gebruikte model heeft invloed op resultaat
 - Lineaire modellen (univ.) meestal onvoldoende, MLR beter
 - Vb. risico voor 'overtraining' bij machine learning modellen (vb NN)
 - Verschil tussen labo en veldtesten
- Zie ook HOOFDSTUK 3

→ Informatie opzet vergelijking

- Uitgebreid literatuur onderzoek
- Volgende criteria:
 - Overeenkomst sensor(box) met referentie metingen
 - Data beschikbaarheid en transparantie van data behandeling, mogelijkheid voor a-posteriori kalibratie
 - Mogelijkheid om verschillende polluenten gelijktijdig te meten
 - Kostprijs, rekening houdend met het aantal polluenten
 - Focus op PM, O₃, NO₂ en CO
- Meest uitgebreid overzicht tot nu toe:
 - 1423 onafhankelijke testen (geen conflict of interest)
 - 64 peer reviewed papers
 - Rapporten (grey literature)

→ Overzicht in functie van een aantal criteria

- Opdeling per criterium:
 - Active / non-active: continued versus discontinued
 - Open source / black box: kalibratie uitvoerbaar door gebruiker of producent?
 - Commercial / non-commercial: te koop en bruikbaar voor elke gebruiker?



Figuur 8: Overzicht van sensorsystemen ifv een aantal criteria: beschikbaarheid (active/non-active), calibratiemodel (black box of open source), commercieel beschikbaar of niet

- Grootste aandeel zijn commerciële sensorboxen die werken volgens blak-box principe.

→ Evaluatiestatistieken

- R^2 meestal:
 - goodness-of-fit
- Helling regressielijn:
 - Accuracy
- Andere statistieken worden ook gebruikt, maar minder. Geen uniformiteit tussen verschillende testprogramma's.

→ Kalibratie

- Mathematisch model relatie sensorbox en referentie meting
 - Verschillende vorm
 - Covariabelen:
 - meteo, interferenten (gas)
 - Relatieve vochtigheid (PM)
- Meestal vertrouwelijke info van de leverancier, black box systemen
- Meestal op basis van veldtesten

→ R^2 vergelijking SSys en referentie

- Op uur en minuut basis
 - Verschillende tests, meestal grote spreiding indien meerdere testresultaten
- Performantie meestal beter wanneer in SSys
- Relatief beperkt aantal tests, dikwijls beoordeling op basis van één testrapport.

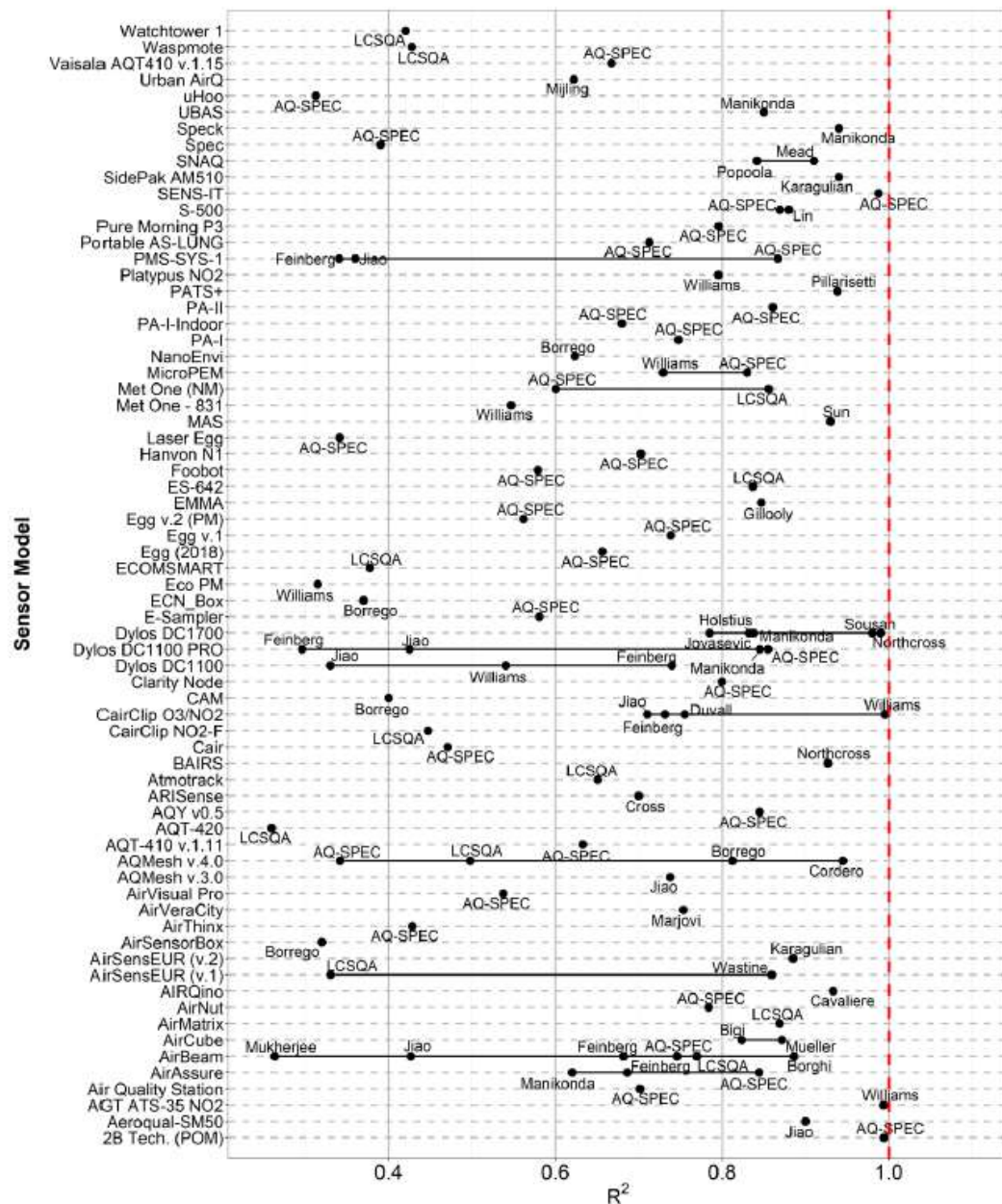


Figure 4. Mean R^2 obtained from the comparison of SSys against reference measurements at all averaging times (1 min, 5 min, 1 h, and 24 h). The author name below each bullet gives the first author of the publication from which results were drawn.

Figuur 9: Gemiddelde R^2 voor vergelijking sensorbox met referentiemeting (uit Karagulian et al., 2019)

→ Kostprijs

- Sensorboxen commercieel aangeboden
- Kostprijs sensorbox

- Excl. werkingskost (kalibratie, onderhoud, installatie, data behandeling)
- Kostprijs vanaf ca. 100 EUR tot 10000 EUR.

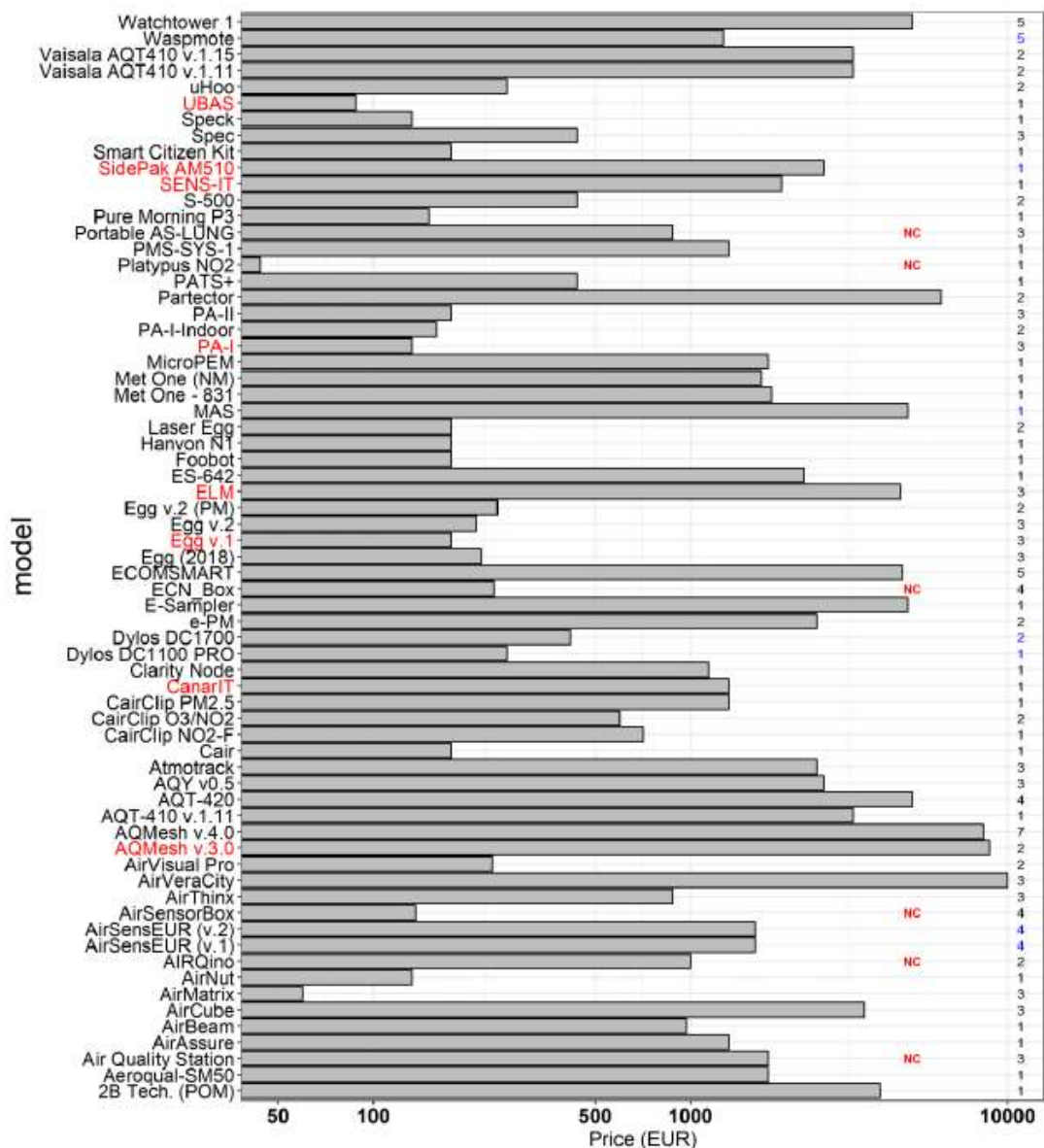


Figure 5. Prices of SSys grouped by model. Numbers on the right indicate the number of pollutants measured by each SSys, with open source in blue and black box in black. The x-axis uses a logarithmic scale. Names of "living" and "non-living" SSys are indicated in black and red colors on the labels of the y-axis, respectively. NC indicates commercially unavailable sensors.

Figuur 10: Prijzen van sensorboxen (SSys) uit Karagulian et al., 2019

→ Shortlist beste sensorboxen

- Sensorboxen met goede prestatie ($R^2 > 0,85$; $0,8 < \text{rico} < 1,2$) voor 1-u gemiddelden voor bepaalde parameters.

Tabel 6: Shortlist van sensorboxen (SSys) (uit Karagulian et al., 2019)

Table 4. Shortlist of SSys showing good agreement with reference systems ($R^2 > 0.85$; $0.8 < \text{slope} < 1.2$) for 1 h time-averaged data.

Model	Pollutant	Mean R^2	Mean Slope	Mean Absolute Intercept	Open/Close	Living	Commercial	Price (EUR)
AirNut	PM _{2.5}	0.86	0.88	8.6	black box	Y	commercial	132
PA-I	PM ₁	0.95	0.92	0.52	black box	N	commercial	132
PA-II	PM ₁	0.99	0.82	1.8	black box	Y	commercial	176
Egg (2018)	PM ₁	0.87	0.85	0.095	black box	Y	commercial	219
PATS+	PM _{2.5}	0.96	0.92	0.05	black box	Y	commercial	440
S-500	NO ₂ , O ₃	0.88	0.97	0.27	black box	Y	commercial	440
CairClip O3/NO2	O ₃	0.88	0.88	12	black box	Y	commercial	600
Portable AS-LUNG	PM ₁	0.89	0.87	1.0	Black Box	Y	non-commercial	880
AirSensEUR (v1)	NO ₂ , O ₃ , CO, NO	0.95	0.98	-	open source	Y	commercial	1600
AirSensEUR (v2)	NO ₂ , O ₃ , CO, NO	0.89	1.1	5.7	open source	Y	commercial	1600
Met One (NM)	PM _{2.5}	0.86	1.1	2.8	black box	Y	commercial	1672
Air Quality Station	PM ₁	0.88	0.90	0.85	black box	Y	non-commercial	1760
AQY v0.5	PM _{2.5}	0.87	0.97	4.0	black box	updated	commercial	2640
Vaisala AQT410 v.1.15	CO	0.87	0.97	0.23	black box	Y	commercial	3256
2B Tech. (POM) *	O ₃	1.00	1.00	0.74	black box	Y	commercial	3960
AQMesh v3.0	NO	0.87	0.88	0.76	black box	N	commercial	8800

Note: * The 2B Tech. (POM) is a miniaturized reference method, UV photometry, which explains the perfect R^2 And slope of 1.

Bovenstaande lijst werd als basis gebruikt om marktstudie uit te voeren (zie HOOFDSTUK 5).

→ Relatie prijs – kwaliteit

- Sensoren:
 - Geen relatie tussen prijs en kwaliteit
- Sensorboxen:
 - Betere kwaliteit, hogere prijs (positief verband)
 - Scatter bij lage prijs

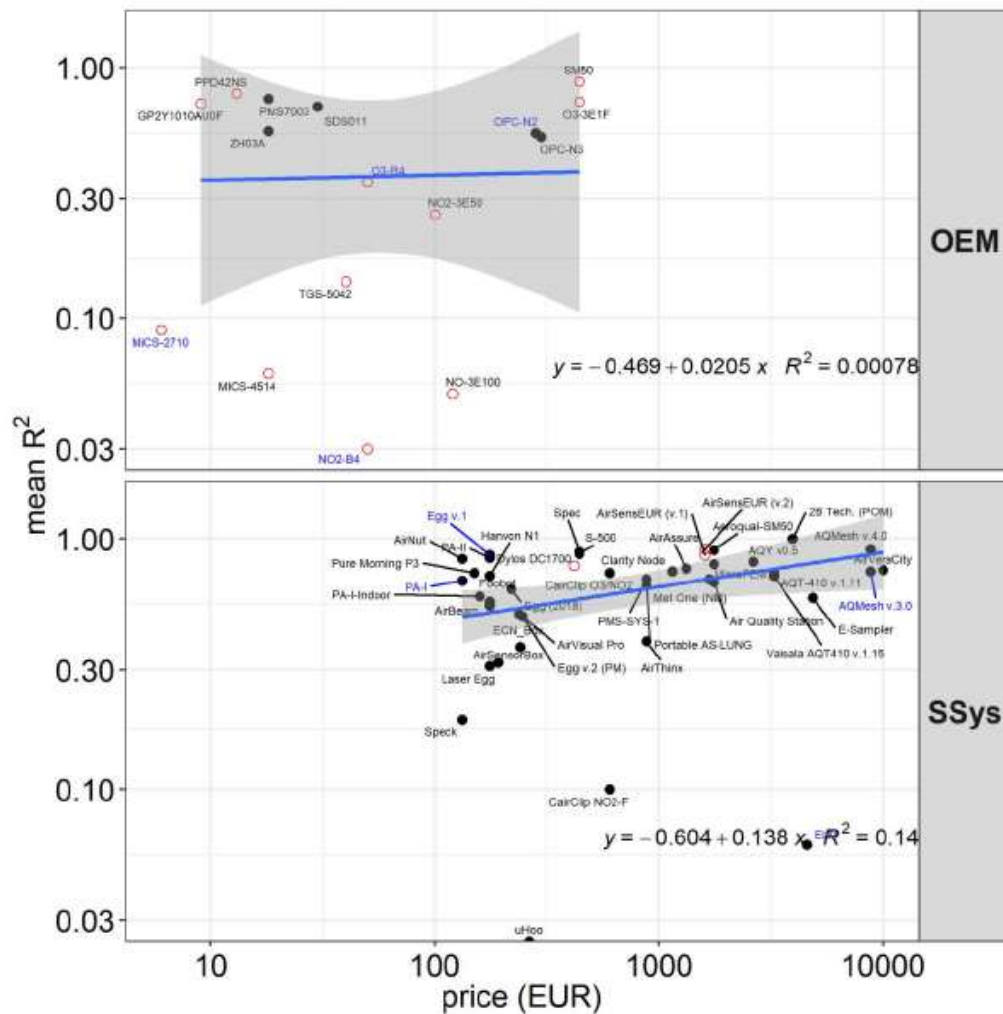


Figure 7. Relationship between prices of LCS and R^2 for field test only. A logarithmic scale has been set for both axes. Open source and black box models are indicated with red open dots and black solid dots, respectively. Names of “living” and “non-living” sensors are indicated by black and blue colors, respectively. R^2 refers to data averaged over 1 h. Grey shade in the fit plots indicate a pointwise 95% confidence interval on the fitted values.

Figuur 11: Verband tussen prijzen en R^2 voor bveldtesten van sensoren (OEM) en sensorboxen (SSys) (uit Karagulian et al., 2019)

4.2. LCSQA

Het LCSQA heeft een vergelijkende studie van PM en gas sensoren uitgevoerd. De test werd uitgevoerd in januari tot midden februari 2018 voor de pollutanten NO_2 , O_3 en PM ($\text{PM}_{2.5}$ en PM_{10}) op een buitenlocatie. In totaal werden 17 verschillende systemen meegenomen in de test (44 sensorboxen in totaal, inclusief duplo's) (Figuur 12). Data werd per minuut verzameld.

Er werd een score-systeem uitgewerkt dat rekening houdt met verschillende aspecten: data kwaliteit, gebruiksgemak, autonomie, draagbaarheid, betrouwbaarheid van de datacommunicatie.

PM	Airmatrix (Normandie Tech'Air) Airbeam (AirCasting) OPC-N2 (Alphasense) Clarity Node (Clarity Movement) NPM 2 (Met One Instruments Inc.) ES-642 (Met One Instruments Inc.) Atmotrack (AtmoTrack by 42 Factory)
NO ₂	Cairclip (Cairpol-Environnement SA)
O ₃	Serie 500 Monitor (Aeroqual)

Mini-stations multi-capteurs		
Commercialisés	ECOMSMART (ECOMESURE)	O ₃ , NO ₂ , PM ₁₀ , PM _{2,5} et PM ₁
	AQT420 (Vaisala)	SO ₂ , CO, O ₃ , NO ₂ , PM ₁₀ , PM _{2,5}
	Watchtower 1 (Rubix Senses & Instrumentation)	NO, NO ₂ , PM ₁₀ , PM _{2,5} , PM ₁
	Cairnet (Cairpol-Environnement SA)	NO ₂ , O ₃ /NO ₂ , PM ₁₀ et PM _{2,5}
	AQMesh (Environmental Instruments Ltd)	NO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , PM ₁₀ , PM _{2,5} , PM ₁
	GreenBee (Azimut Monitoring)	O ₃ , NO ₂ , PM ₁₀ , PM _{2,5} et PM ₁
Do it yourself/ Opensource	Waspnote Plug & Sense!/Smart Environnement PRO (Libelium)	NO, NO ₂ (x3), PM ₁₀ , PM _{2,5} , PM ₁
	AirSensEUR	NO ₂ , CO, O ₃ , NO

Figuur 12: Overzicht van de sensorboxen die deelnamen aan de test: één-sensor systemen (blauw) en multi-sensor systemen.

De kwantitatieve criteria die beoordeeld werden zijn:

- Variabiliteit tussen sensorboxen van hetzelfde type

Variabilité					
>75%	<75%	<50%	<25%	<10%	<5%
0	1	2	3	4	5

- R^2 en richtingscoëfficiënt van lineaire regressie met intercept tussen sensor data en referentie data

Pente						
Valeur	$p > 5$ ou $p \leq 0,02$	$5 \geq p > 4$ ou $0,02 < p \leq 0,25$	$4 \geq p > 3$ ou $0,25 < p \leq 0,33$	$3 \geq p > 2$ ou $0,33 < p \leq 0,5$	$2 \geq p > 1,5$ ou $0,5 < p \leq 0,75$	$1,5 \geq p \geq 1$ ou $0,75 < p \leq 1$
Note	0	1	2	3	4	5

R^2						
Valeur	NC	$\leq 0,3$	$\leq 0,5$	$\leq 0,7$	$\leq 0,9$	$> 0,9$
Note	0	1	2	3	4	5

- MAPE mean absolute percentage error

MAPE						
Valeur	>75%	<75%	<50%	<25%	<10%	<5%
Note	0	1	2	3	4	5

De conclusies van de studie zijn de volgende (Tabel 7):

Door slechts één verontreinigende stof, NO_2 en $\text{PM}_{2,5}$ onafhankelijk te beschouwen, hebben de systemen algemene prestaties variërend van gemiddeld tot zeer goed. Met name de NPM2 (Met One) en Airmatrix systemen voor $\text{PM}_{2,5}$ en het Watchtower 1 systeem voor NO_2 tonen de beste resultaten met een MAPE minder dan 100%, een R^2 groter dan 0,75, een correlatiehelling dicht bij 1 en inter-systeem variabiliteit van minder dan 5%. De NPM2 (Met One) en Airmatrix systemen hebben echter lagere scores op andere aspecten, met name vanwege hun gebrek aan veelzijdigheid en het verlies van gegevens tijdens de trainingsperiode.

Andere systemen, Clarity node G en AQMesh voor $\text{PM}_{2,5}$ en AQT420 (Vaisala) voor NO_2 , hebben een minder goede correlatie dan de vorige systemen ($0,5 < R^2 < 0,75$). Ze blijven echter goede potentiële kandidaten vanwege de lage variabiliteit ($< 15\%$). Deze systemen krijgen goede kwaliteitsscores.

Ten slotte voldoet geen van de geëvalueerde systemen aan de datakwaliteitsdoelstellingen (DQO) van de Europese richtlijnen 2008/50 /EG en 2015/14/80 voor metingen op vaste locaties in NO₂, O₃ en PM (respectievelijk van 15 %, 15% en 25%), sommigen voldoen wel aan de criteria van de indicatieve methoden, met name voor PM_{2,5} (DQO van 50%).

Tabel 7: Overzicht resultaten sensorbox testen door LCSQA.

NO2		var	MAPE	R ² score	R ²	rico	IPI
AB	Cairclip - Cairpol	0,0	0,0	2	≤0,5	3,0	74,9
C	Ecomasure	2,0	2,0	3	≤0,7	5,0	77,4
D	AQT420 Vaisala	4,0	3,0	3	≤0,7	5,0	77,3
EA	Waspmote Libelium	3,0	0,0	3	≤0,7	4,0	80,9
EB	Watchtower 1 Rubix	5,0	0,5	4,5	0,9	4,5	89,2
EC	AQT420 Vaisala	4,0	0,0	2,5	≤0,6	0,0	77,2
F	Watchtower 1 Rubix	n/a	0,0	3	≤0,7	5,0	68,6
HA	Cairnet	0,0	1,0	1,5	≤0,4	2,0	69,4
J	AQMesh	1,0	0,0	3	≤0,7	4,0	68,7
L	AirSenseur	n/a	0,0	4	≤0,9	0,0	30,8

O3		var	MAPE	R ² score	R ²	rico	IPI
C	Ecomsmart, Ecomasure	2,0	0,0	1,0	≤0,3	4,0	69,3
D	AQT420 Vaisala	3,0	0,0	2,0	≤0,5	5,0	65,4
EC	AQT420 Vaisala	4,0	0,0	2,0	≤0,5	0,0	66,9
F	Watchtower 1, Rubix	n/a	0,0	0,0	n/a	0,0	36,0
HA	Cairnet	0,0	0,0	1,0	≤0,3	1,0	67,5
J	AQMesh	1,0	0,0	3,0	≤0,7	4,0	74,2
L	AirSensEUR	n/a	0,0	1,0	≤0,3	4,0	33,0

PM2,5		var	MAPE	R ² score	R ²	rico	IPI
AA	Airbeam, Aircasting	1,0	0,5	4,0	≤0,9	3,5	19,7
AC	OPC-N2 Alphasense	n/a	0,0	0,0	n/a	3,0	64,4
B	Airmatrix	n/a	3,0	4,0	≤0,9	5,0	63,3
C	Ecomsmart	5,0	0,0	1,0	≤0,3	3,0	76,4
D	AQT420, Vaisala	0,0	1,0	0,0	n/a	0,0	44,7
EA	Waspmote, Libelium	n/a	0,0	0,0	n/a	5,0	66,8
EB	Watchtower 1, Rubix	n/a	0,0	2,0	≤0,5	2,0	75,5
EC	AQT420, Vaisala	5,0	0,5	0,0	n/a	1,0	47,2
F	Watchtower 1, Rubix	n/a	0,0	1,0	≤0,3	2,0	54,4
G	Clarity Node	4,0	0,0	3,0	≤0,7	4,0	82,8
HB	Cairnet	n/a	0,0	0,0	n/a	1,0	61,4
I	Atmotrack	2,0	0,0	3,0	≤0,7	4,0	78,5
J	AQMesh	3,0	3,0	3,0	≤0,7	5,0	80,4
KA	NPM 2, Met One	5,0	2,0	4,0	≤0,9	5,0	82,0
KB	ES-642, Met One	n/a	0,0	4,0	≤0,9	0,0	70,4
O	e-PM, EcoLogicSense	0,0	1,0	0,0	n/a	1,0	46,3

4.3. AQ-SPEC

Tot op heden is het testprotocol ontwikkeld door AQ-SPEC toegepast op een groot aantal sensoren en sensorboxen. De kwaliteit van sensoren wordt hierbij beoordeeld als een R^2 van de lineaire regressie tussen sensor en referentie (referentie of equivalent method) metingen. Ook de regressievergelijking (intercept en richtingscoëfficiënt) wordt gerapporteerd. De testen door AQ-SPEC hebben het voordeel van de uniformiteit, een heel aantal tests werd op gelijkaardige wijze uitgevoerd waardoor de resultaten vergelijkbaar zijn. Het moet wel opgemerkt worden dat niet alle tests in dezelfde periode gelopen hebben, er kan daarom een verschil zijn in de concentraties van pollutanten tijdens de testen. De outdoor testen worden wel allemaal uitgevoerd op eenzelfde locatie.

Meer informatie over het AQ-SPEC test protocol is gegeven in HOOFDSTUK 3.

4.4. AIRLAB

In de Microsensor Challenge van AirLab worden sensorboxen getest. De relevante testen voor dit rapport zijn de outdoor testen. De eindscore (weergave als sterren) wordt bepaald op basis van een analyse van verschillende criteria (zie 3.2.6). Niet alle sensoren meten dezelfde/evenveel pollutanten.

Het eindresultaat van de studie uit 2019 vertoont niet veel spreiding, min. 3 tot max. 4 sterren. De systemen met de beste score meten enkel PM, en in twee gevallen aangevuld met NO_2 (

Tabel 8). De bekendere sensorboxen (AQMesh, Kunak Air A-10, Vaisala AQT410) hebben dezelfde eindscore.

Outdoor Air – Monitoring (OA-M) AIRLAB

brand	name	star-score
• 42 Factory	ATMOTRACK	★★★★★
• LoThoSoft	AVC2	★★★★★
• RUBIX S&I	WT1	★★★★★
• SIM Engineering	SIM-MONI	★★★★★
• ADDAIR	AQMesh	★★★★★
• AGRISCOPE	PM-SCOPE	★★★★★
• Airlabs	AIRNODE	★★★★★
• Decentlab GmbH	Air Quality Station	★★★★★
• Kunak Technologies	KUNAK AIR A-10	★★★★★
• Pollutrack	Pollutrack	★★★★★
• VAISALA SAS	AQT410	★★★★★
• Airly	Airly	★★★★★
• Clarity Movement Co.	Node-S	★★★★★
• ECOMESURE	ECOMSMART	★★★★★
• HabitatMap	AirBeam2	★★★★★
• NanoSense	QAA-RE	★★★★★

Tabel 8: Overzicht van de sensorboxen die deelnamen aan de Microsensor Challenge 2019 van AirLabs met weergave of pollutanten $PM_{2,5}$, NO_2 en O_3 al dan niet gemeten worden.

Merk/leverancier	Naam	$PM_{2,5}$	NO_2	O_3	Aantal sterren
42 Factory	ATMOTRACK	x	x		3
LoThoSoft	AVC2	(PM_{10})	x	x	3
RUBIX	WT1	x	x		3
SIM Engineering	SIM-MONI	x	x	x	3
ADDAIR	AQMesh	x	x	x	3,5
Agriscope	PM-SCOPE	x			3,5
Airlabs	AIRNODE	x	x	x	3,5
Decentlab	Air Quality Station		x	x	3,5
Kunak Technologies	KUNAK AIR A-10	x	x	x	3,5
Pollutrack	Pollutrack	x			3,5
Vaisala SAS	AQT410		x	x	3,5
Airly	Airly	x			4
Clarity Movement Co.	Node-S	x	x		4
Ecomesure	ECOMSMART	x	x		4
Habitatmap	AirBeam2	x			4
NanoSense	QAA-RE	x			4

Voor de pollutanten afzonderlijk (enkel $PM_{2,5}$ en NO_2) wordt ook een overzicht gegeven. De conclusie van AirLabs is dat outdoor sensorboxen meestal PM en NO_2 meten. De NO_2 metingen zijn over het algemeen beter dan de PM metingen. Ozon metingen zijn niet even consistent en regelmatig veel minder goed. Een overzicht van outdoor sensorboxen die beter dan 7 scoren (geïntegreerde index, zie Fishbain et al, 2017) voor $PM_{2,5}$, PM_{10} en NO_2 zijn hieronder weergegeven (Figuur 13).

In outdoor air (OA)



>> PM2.5

brand	name	score
• ADDAIR	AQMesh	7.8
• Airly	Airly	7.7
• Clarity Movement Co.	Node-S	7.2
• NanoSense	QAA-RE	7.2
• Pollutrack	Pollutrack	7.1
• 42 Factory	ATMOTRACK	7.1
• AGRISCOPE	PM-SCOPE	7

>> PM10

brand	name	score
• ADDAIR	AQMesh	7.9
• AGRISCOPE	PM-SCOPE	7.2
• Airly	Airly	7.1

>> NO2

brand	name	score
• Azimut-Monitoring	Greenbee	8.9
• ECOMESURE	ECOMSMART	8.5
• SIM Engineering	SIM-MONI	8.5
• Decentlab GmbH	Air Quality Station	8.4
• ADDAIR	AQMesh	8.3
• LoThoSoft	AVC2	8.1
• VAISALA SAS	AQT410	8
• Airlabs	AIRNODE	8
• RUBIX S&I	RUBIX WT1	7.9
• Kunak Technologies	KUNAK AIR A-10	7.5
• Azimut-Monitoring	Greenbee	7.1

De Greenbee van Azimut-Monitoring staat dubbel in de lijst.

Figuur 13: Overzicht van prestaties van sensorboxen voor PM2,5, PM10 en NO2 (gereproduceerd uit AirLab MicroSensors Challenge 2019).

Van de meer bekende systemen scoort AQMesh het beste voor PM en NO₂. De Vaisala AQT410 heeft geen PM sensor, en scoort goed voor NO₂.

In 2018 werden er minder sensorboxen getest. Interessant is wel dat de sensorbox van Aeroqual (polluenten NO₂, O₃ en PM) en van Cairpol (Envea) (NO₂ en PM) getest werd. Beide behaalden een score van 3 sterren. De AQMesh scoorde iets minder goed dan in 2019.

Surveiller la qualité de l'air extérieur AIRLAB

marque	nom	étoile
• RUBIX S&I	RUBIX WT1	★★★★★
• EYNIX	SenseInAir	★★★★★
• Aeroqual Ltd	AQY 1	★★★★★
• ADDAIR	AQMesh	★★★★★
• Environnement - Cairpol	Cairnet SPM	★★★★★
• AGRISCOPE	PM-SCOPE	★★★★★
• Clarity Movement Co.	Node-S	★★★★★

De Microsensor challenge is een mooi voorbeeld van een gestandaardiseerd testprotocol en communicatie format voor de testresultaten. De manier van rapporteren is overzichtelijk en informatief, maar de interpretatie op basis van een geïntegreerde index is toch niet evident.

4.5. OVERZICHTSTABEL

In de overzichtstabel *evaluatie_sensorboxen.xlsx* worden testresultaten op basis van simultane outdoor metingen met sensorbox en referentie instrumenten weergegeven. De tabel is opgesplitst voor polluenten NO₂, O₃ en PM_{2,5}.

	kolom nr	kolom hoofding	
	1	naam	
	2	leverancier	
	3	sensor principe	meetprincipe
	4	sensor	
	5	testen uitgevoerd door	
info testset-up (outdoor)	6	type locatie	
	7	aantal sensorboxen	aantal boxen opgenomen in de test
	8	meetfrequentie	
	9	testrange	concentratiebereik
	10	duur	
	11	data coverage	volledigheid dataset
	12	referentie monitor	welke monitor
	13	tijdsresolutie vergelijking	
vergelijking met referentie	14	intercept	van lineaire regressie van sensor tov. Referentie metingen
	15	rico	
	16	R ²	

	17	correctiemodel (j/n)	
	18	parameters	
inter-sensor variabiliteit	19	R^2	
	20	afwijking	
	21	aantal	

Enkele conclusies zijn dat:

- Voor NO_2
 - De R^2 tussen 0 en 0,85 ligt
 - Grote verschillen
 - Intercept en richtingscoëfficiënt verschillen frequent van (0, 1), kalibratie nodig
- Voor O_3
 - De R^2 tussen 0 en 0,98 ligt
 - R^2 meestal $> 0,7$; verschillen tussen sensorboxen is kleiner
 - Intercept en richtingscoëfficiënt verschillen frequent van (0, 1), kalibratie nodig
- Voor $\text{PM}_{2,5}$
 - De R^2 tussen 0,26 en 0,99 ligt
 - R^2 meestal $> 0,7$; verschillen tussen sensorboxen kleiner
 - Intercept en richtingscoëfficiënt verschillen frequent van (0, 1), kalibratie nodig

HOOFDSTUK 5. MARKTBEVRAGING

Er werd een selectie gemaakt van commerciële sensorboxen op basis van shortlist van sensorboxen uit het overzichtsartikel van Karagulian et al., 2019 (zie Tabel 1). Deze lijst werd aangevuld met sensorboxen die geselecteerd zijn voor AQUILA vergelijking gecoördineerd door JRC. Bij de selectie van de SSys voor de geplande vergelijking waren de criteria o.a. focus op Europese producten, geen prototypes, geïntegreerde systemen, DQO (volgens Class A of B volgens de draft standaard), gekende kalibratiemethode, open data rapportering, kostprijs. De geselecteerde systemen hiervoor zijn: Vaisala, Southcoast (Praxis), AQMesh, Cairsense (NO₂), Kunak (PM), AirSenEUR, Dylos (1700 and 1100), CO₂ (ELT, B530)), Edingburgh sensors Gascard NG. De laatste drie werden niet opgenomen omwille van niet relevant (CO₂) of geen weersbestendige outdoortoepassing (bron: sensor workshop, 1 oktober, Wenen.)

SSys uit de tabel van de overzichtspublicatie werden niet weerhouden wanneer het geen stand-alone sensorboxen zijn of wanneer ze enkel voor indoortoepassingen bedoeld zijn. Wanneer verschillende (openvolgende) versies vermeld stonden, wordt enkel de meest recente weerhouden en indien een recentere of betere versie beschikbaar is werd deze opgenomen voor de bevraging (vb. AQY in plaats van S-500 van Aeroqual). Airly werd ook nog toegevoegd aan de lijst.

Op basis van bovenstaande methode komen we tot onderstaande selectie. Om extra informatie te bekomen over deze sensorboxen werd een marktbevraging uitgevoerd.

Tabel 9: Lijst van geselecteerde sensorboxen en firma's voor de marktbevraging.

Sensor box	Firma
AQT410/420	Vaisalla
AQMesh	AirMonitors
Kunak sensor box	Kunak
Airsenseur	LiberalIntentio S.r.l
AQY	Aeroqual
POM	2B Technologies
Praxis	South Coast Science Limited
Cairnet (with cairsens sensors)	Envea
AirVeraCity	AirVeraCity
PAII	Purple Air
PATS+	Berkeley Air Monitoring Group
MetOne (E-sampler en Neighborhood monitor)	metOne
SCI - 608 – Criteria Pollutant Sensor sensor box	Cooperenvironmental
Airly	Airly

5.1. VRAGENLIJST

De vragenlijst werd opgesplitst in vier delen, m.n. specificaties van de sensorbox, gebruik van de sensorbox (operations), data en kostpijls. Hieronder wordt de vragenlijst weergegeven.

Question 1: Specifications.

- What air pollutants are monitored by the sensor box? (please give all possible pollutants and also minimum configuration)
- Is it a modular unit (f.e. extendable with other sensors)?
- Which sensors are used (type, manufacturer)?
- What is the minimum time resolution?

Question 2: Operations.

- Is the box/network plug and play? Easy installation and operation? What is the estimated effort in terms of manhours (if not performed by manufacturer)
- What is the lifetime of a sensor box? (We understand that this is not an easy question. Suggest we need a sensor network to be operational for long term eg. 5 y)
 - o What is the lifetime of different components of sensor box or entire sensor box?
 - o What replacements or interventions are needed within 5 years
- Is replacement of the sensors required? What is the recommended frequency?
- Is there any other intervention needed (f.e. quality checks, calibration or co-location...)? If so, at what frequency?

Question 3: Data.

- Is the data transferred in real-time to a database?
- Is there a visualization and data access for the user? If yes, can you show an example?
- Is data privacy guaranteed?
- Can data be transferred to a local database of the client?
 - o By transferring data from sensor database to database of client (need for open data principle): Y/N
 - o By transferring data directly from sensor box to local database of the client: Y/N
- Data availability: is raw data available? If applicable: is corrected data available and is the correction method available or is it black box?

Question 4: Cost.

- What is the cost of one sensor box? Please specify different options in terms of pollutants measured, options available (power supply, data communication, ...)
- Is there a license cost to use the system and access the data?
- What is the cost to set-up a monitoring network of 3 sensor boxes (including measurements for PM2.5, NO2, O3)? Including everything that is needed to operate the system (licence cost, data platform)
- What is the estimated average operational cost (replacement parts, man hours) for 1 year of operation?

5.2. OVERZICHT ANTWOORDEN

5.2.1. SPECIFICATIES

Tabel 10: Antwoorden op vragen m.b.t. sensorbox specificaties.

Aanvullingen in **blauw** zijn eigen interpretatie op basis van aangeleverde informatie door leverancier.

	Polluenten	Modulair	Welke sensoren	Tijdsresolutie
AQT410/420	1. NO ₂ , NO, O ₃ , CO 2. NO ₂ , SO ₂ , O ₃ , CO 3. NO ₂ , SO ₂ , CO, H ₂ S + all of the above with PM _{2.5} /PM ₁₀ included	no	- Alphasense EC cells for gases - Proprietary Laser Particle Counter for PM_{2.5}/PM₁₀	1 minute for gases 3 minutes for particles
AQMesh	NO, NO ₂ , O ₃ , CO, CO ₂ , SO ₂ , H ₂ S, VOC's, PM ₁₀ , PM ₄ , PM _{2.5} , PM ₁ , Noise, Temp, Humidity and At Press.	yes	Alphasense and own manufacture	1 seconds reading, 1 minute reporting
Kunak sensor box	The device can monitor up to four gases from (CO, O ₃ , NO, NO ₂ , H ₂ S, SO ₂), temperature, humidity and atmospheric pressure. Additional sensors can be added such as PM ₁ , PM _{2.5} and PM ₁₀ particle counter, sound level meter, anemometer and rain gauge etc.	Current version is factory configurable with up to 4 gas sensors and particles. New KuanAir version, available at the end of 1Q 2020, will be completely modular and the end user could be able to add or remove gas sensors, depending on their needs or applications.	CO: Alphasense CO-B4 Carbon Monoxide Sensor NO: Alphasense NO-B4 Nitric Oxide Sensor NO ₂ : Alphasense NO ₂ -B43F Nitrogen Dioxide Sensor O ₃ : Alphasense OX-B431 Oxidising Gas Sensor: Ozone + Nitrogen Dioxide H ₂ S: Alphasense H ₂ S-B4 Carbon Monoxide Sensor SO ₂ : Alphasense SO ₂ -B4 Sulfur Dioxide Sensor PM: Alphasense OPC-N3 Particle Monitor	configurable remotely (from the cloud) between 10 seconds up to several hours.

Airsenseur	AirSenseEUR is modular and can be extended by integrating several electronic boards.	For what is related to chemical sensor's type, a minimum configuration set is made by 4 chemical sensor channels. Usually people ask for NO, NO2, CO, OX but we have researchers working with NO, NO2, CO, SO2. The four channels may accommodate different sensors types due to the full analog front-end programmability. Other channels may be added by integrating multiple chemical boards (each board is able to handle 4 channels) but, even this is possible, only few researchers were interested in this feature and, for this reason, current enclosure supports 4 chemical channels.	AirSenseEUR was successfully tested with Alphasense (mainly) and Membrapor chemical sensors. For what is not related to chemical sensor technology, the unit may be equipped with a CO2 sensor (by ELT), a PM sensor (by Alphasense) and/or a PM sensor (by Plantower), temperature, pressure and humidity sensors (Bosh Sensortech and Sensirion).	Speaking about resolution, the electronics is able to generate samples each 5 seconds. The minimum resolution is mainly related to the sensor type. We usually refer to 18 seconds for chemical sensors, one minute for CO2 and PM sensors.
AQY	NO2, O3, PM2.5	no	PM: lazer scattering NO2, O3: electrochemical	1 min, 5 min, 10 min, 15 min, 20 min, 30 min, 1 hr, 2 hr, 4 hr, 8 hr, 12 hr, 24 hr
Cairnet	A Cairnet® device is a real-time standalone and networkable air-monitoring station containing up to six Cairsens® microsensors and cellular communication within a waterproof housing. The most common types of pollutants are monitored: H2S/CH4S, NH3, nmVOC, O3/NO2, NO2, CO, SO2, PM10 & PM2.5	It is a modular station fitted with up to six sensors and compatible with an weather station.	It is based on Cairsens® microsensors manufactured by ENVEA. They use electrochemical cells for most of gases, PID (Ionization potential 10.6eV) for nmVOC and laser scattering light for our latest particulate matter (PM) Cairsens®	The measurements done by the Cairsens microsensors have an resolution of 1 ppb with 1-minute sliding average. Detection Limit go from 10 ppb for some microsenros (H2S range 0-1000 ppb for example) to 500 ppb for the others

				(NH3 or nmVOC range 0 to 16 ppm for example).
POM	O3 Personal ozone monitor	no	UV absorbance	10 sec (2 sec fast mode)
Praxis	PM1, PM2.5, PM10, CO, H2S, NO, NO2, O3, SO2, VOCs, CO2	Max 4 gas sensors or 3 gases with PID, exact gases must be conformed at time of ordering, not expandable after built.	Alphasense OPC-N2/N3, Alphasense electrochemical sensors, PID, NDIR	Sampling every 10 seconds if needed
AirVeraCity	By default CO, NO2, O3, PM1, PM2.5, PM10, internal Temperature and Humidity. A minimum configuration would be CO, NO2, O3. Upon request we can provide VOC, LDSA, noise, pressure and external temperature and humidity.	Yes, our latest version AirVeraCity node V2.0 measures 26 cm × 12 cm × 8 cm and is modular and extendable. Meets IP65 and IP66 waterproofing requirements.	It depends as to the configuration. The sensors themselves are interdependent and their configuration is specific to other components e.g. the air pump. In addition, we are somewhat sensor agnostic and our approach and array of sensors used is changing and is reflective of advances made in the market.	4 seconds
PAII	PM1, PM2.5, and PM10	no	PlanTower laser counters, PMS5003 for PA-II and PA-II-SD and PMS1003 for PA-I-Indoor	2 minutes
PATS+	PM, and temperature, humidity, movement, and battery voltage	no	n/a	2 seconds to 1 hour
MetOne (E-sampler)	PM10, PM2.5, PM1, TSP Monitoring	no	Dual: laser light scatter sensor and gravimetric sampling system on filter	1 minute to 1 hour
SCI - 608	PM+O3+NO2+SO2+CO	Yes, a typical configuration would include PM10, PM2.5, SO2, NO2, CO and O3. All of the configurations listed below are possible – pricing for a	For gas phase we use alphasense sensors, for PM we use a Chinese manufacturer. We apply a three step	Lowest time resolution is 1 minute

		sensor node will depend on the chosen configuration. PM / CO / PM +CO / NO2 / PM+NO2 / O3 + NO2 / PM+O3+NO2 / PM+O3+NO2+SO2 / PM+O3+NO2+SO2+CO	calibration process to the sensors. In the first step sensors whose response to concentration are not sufficiently linear are eliminate. In the second step the sensors are calibrated in a chamber where they are exposed to several concentration levels of the pollutants of interest, at various relative humidity levels and temperatures as well as in the presence of any interfering gases. Finally once the sensor is deployed in the field a final calibration is performed relative to a reference instrument.	
Airly	PM1, PM2.5, and PM10 NO2, SO2, CO and O3	no	PM lazer scattering Gas: n/a	n/a

5.2.2. GEBRUIK

Tabel 11: Antwoorden op vragen m.b.t. gebruik van de sensorbox.

Aanvullingen in **blauw** zijn eigen interpretatie op basis van aangeleverde informatie door leverancier.

	Plug and play	Lifetime	Interventions	Replacement of sensors	Other interventions
AQT410	- Maintenance is instructed in the User's Guide. Mounting fixture and cables included. Configuration software for laptop/PC provided. Need connection to power supply and to data acquisition (RS232/RS485/MODBUS) - With the wireless gateway MOG100 (needs customer SIM card) automatic connection to Vaisala Cloud service	EC cells: 18-36 months Laser Particle Counter: 5+ years for 1 min sample every 10 minutes duty cycle Rest of instrument: 5+ years	2 x EC cells replacement + particle sensor filter change	EC cells: 18-36 months Laser Particle Counter: 5+ years for 1 min sample every 10 minutes duty cycle	Annual co-location or performance check recommended
AQMesh	Installation takes less than 5 minutes, no skills or special tools required.	Up to 10 years, sensors are guaranteed for 2 years. Replacement of pump and PM optics.	Cleaning of PM inlet at six monthly intervals	2 years for gas sensors and 5 years for PM sensors	/
Kunak sensor box	Yes, it is easy installation and operation device. It can be installed, as a new installer as a first time, in less than 30 minutes.	Normally, batteries and electronics can last up to 5 years. Just changes are required if some component is broken. Only sensor must to be changed	Yes, some calibrations are needed but they can make remotely. We recommend to make them every three months, when the season change. (see extra info below)	Yes it is a replacement of sensors required. The recommended frequency for each sensor: O3 and NO2: once a year (although they can last up to two years, we recommend to change it	(see extra info below)

		over the whole product life or the replacement of any PCB if some component is broken. Battery life can be between 3 to 6 years, depending on the cycling time in the place of installation. I mean if there is low solar radiation, normally deeper discharging will occur, reducing battery life.		every two years for optimal performance). NO, SO₂, H₂S, CO: once every two years PM sensor: This sensor will be changed only if it breaks down, normally after two years continuous operation.	
Airsenseur	AirSenseEUR is an Open Platform. For this reason, it's not to be considered an "end-user" product but a platform where a lot of customization can be done. This requires some sort of knowledge in embedded systems, Linux and networking. At Liberaintentio S.r.l. we're working to reduce the skills needed to start with AirSenseEUR by selling near "ready-to-go" prototypes. Units were assembled and equipped with sensors; tested and configured for data transfer. The	This is a very difficult question. We don't have experience with units running more than one Year with no human interventions.	Chemical sensors shall be replaced Yearly, but this period is still subject to research and publications and it's based on the surrounding environment conditions. A periodic calibration may be useful to determine the sensor's end of life and drift. We have units running 1 Year old sensors with	Due to chemical sensors air exposure, and air suction by the PM sensor, a periodic cleaning of sensors is desirable. This may be done through compressed air with the help of a paintbrush on the PM filter and the chemical sensor surface. The cleaning periodicity varies based on the operative environment condition but it's expected in the range of 6	No specific maintenance is needed to the electronic side for installed units, except if major software problems are detected and/or firmware update with significant improvement are released. The installed memory is able to store more than a Year of continuous sampling data. Local data may be

	user needs to insert a SIM on the GPRS dongle and configure some parameters associated to the mobile operator and the servers where data are pushed. This can be done via a web panel integrated in the AirSensEUR. More sophisticated configurations are still needed if some extra-features are required. Liberaintentio S.r.l. provides, complementary with the prototypes and for the 1st Year, some database servers for data storage and retrieval thus allowing for a quick start with the units.		acceptable drifts and no recalibration.	months. No filter changes are required, being all filters made of stainless-steel mesh. We expect battery backup to be replaced periodically but, again, this highly depends on the environment conditions (mainly working temperature and number of charge/discharge cycles as the battery expected life (80% DOD at 20°C) is > 2000 cycles).	periodically removed through VPN, when available, or local WiFi connection.
AQY	Yes	System: 5 years Sensors: ca. 12months based on 0-50 µg/m3 annual average PM10	n/a	Replacement of sensors every year	n/a
Cairnet	Yes, it is completely plug & play and IoT ready for data transmission in the cloud. The detection & association of the Cairsens micro-sensors / Cairnet / Caircloud is automatised. No human intervention is needed. No cables or complicated installation, just insert your SIM card and let done.	- The expected lifetime of the Cairnet® housing and its component is more than 5 years. Several units are now deployed for more than 10 years. - Only Cairsens® micro-	The Cairnet® housing requires only annual maintenance, when sensors should be replaced after 1 year of use.	Yes, Cairsens® micro-sensors should be replaced after 1 year of use.	No further intervention is required beyond a simple check of the cleanliness of the panels. This is monitored directly from the Caircloud thanks to the function "tracking state of life of the Cairnet" that allow

	It's shipped with it mouting kit. It is easy to use (less than 5 minutes) and easy to move.	sensors should be replaced after 1 year of use.			advanced remote diagnosis as like to survey the wolar panels power. • Cairsens® are manufactured in France by ENVEA and calibrated in our metrological laboratory using Standard Reference AQMS monitors. Every sensor shipped includes a calibration certificate. No maintenance and no need for recalibration for 1 year warranty
POM	yes	Lifetime is limited by contamination and pump lifetime. We therefore recommend annual cleaning and re-calibration.	annual cleaning and re-calibration	no	no
Praxis	Lift out of the box, pull a small plug out, send us an email, thats it your done.	No life time expectancy built in, its . robust unit & the sensors needs changing every 2 years, again, a simple job for most.	Replacement of the sensors	Sensors every 2 years	Occasional base line checks, as & when desired.

AirVeraCity	Yes. It simply requires a power supply and can be battery operated.	The lifetime of the box can be many years. The average life of the shortest life sensor is 18 months.	We typically sell our sensors as a service because it allows us to replace individual components depending on individual component drift.	We typically take care of this but don't mind explaining further how we do this.	Typically, we conduct a stationary calibration process done in an environment that matches the ambient conditions where it is deployed. Our core strength is to do this on a mobile basis which means we can re-calibrate as needed based on actual conditions experienced.
PAII	yes	PurpleAir sensors have a life expectancy of ca. 2 years. Some last much longer than that and others don't.	Typically, the issue is degradation of the laser counters used in the sensors or having an insect or spider moving into one of the laser counter. The laser counters can be cleaned or replaced to prolong the life of the sensor.	The laser counters can be cleaned or replaced to prolong the life of the sensor.	n/a
PATS+	Yes, sensorbox is programmed before deployment	n/a	If the baseline photoelectric signal increases over 100 mV, it is recommended to clean the PE chamber.	Cleaning and calibration, no information on replacement	Zeroing before deployment (10 minutes)
MetOne (E-sampler)	Yes, configurable by user	The E-Sampler brushless		The laser diode has a finite lifetime which will be	Field calibrations and maintenance.

		diaphragm sample pump should last at least 10,000 hours or more than one year during continuous operation. The exact lifetime will depend on how harshness of the sampling environment.		reduced at high temperatures. It may eventually fail and need to be replaced at the factory.	
SCI - 608	Yes it can connect to cellular networks. Approximately 1 hour per box with two people (two people are recommended for installation of the sensor with a solar panel and battery box.	The sensors themselves will last approximately 2 years and can be replaced in the field. It would be reasonable to expect that the sensors boxes themselves will last longer than 5 years.	The recommended replacement frequency depends on the sensor performance which can be monitored remotely.		We do recommend a field calibration against a reference method instrument periodically (once every three months or so). This would require collocation with a reference station.
Airly	Yes	n/a	n/a	n/a	n/a

A detailed timeline for interventions is provided by Kunak:

ACTIVITY	2-4 WEEKS	4-6 months	12 months	18 months	24 months	WHO
QC/QA against reference station prior to deployment. Sensitivity and baseline calibration can be done if required.	X ¹					Technician / Authorized agent/Kunak
Sensitivity and baseline calibration against a gold unit or reference station		X ¹	X	X ¹	X	Technician / Authorized agent / Kunak
Check and cleaning OPC (In locations with high concentration of particles)		X	X	X	X	End user / Technician / Authorized agent
Check and cleaning OPC			X		X	End user / Technician / Authorized agent
Replacement of PM sensor					X ¹	Kunak / Authorized agent / technician
Replacement of NO2 sensor			X ¹		X ²	Kunak
Replacement of O3 sensor			X ¹		X ²	Kunak
Replacement of NO sensor					X	Kunak
Replacement of CO sensor					X	Kunak
Replacement of SO2 sensor					X	Kunak
Replacement of H2S sensor					X	Kunak

¹ Just required for optimal performance.

² Operating life if applying correct calibrations with a small decrease in performance. 12 month recommended operating life for best performance

5.2.3. DATA

Tabel 12: Antwoorden op vragen m.b.t. data communicatie, opslag, calibratie en visualisatie.

	Transmissie	Visualizatie	Privacy	Transfer naar eigen database	Beschikbaarheid ruwe data
AQT410	Yes if the sensor is equipped with our separate data gateway MOG100	Yes	https communication	• By transferring data from sensor database to database of client (need for open data principle): Y, using XML API • By transferring data directly from sensor box to local database of the client: Y, but available only on a case by case basis	• By default only concentration data available • A linear correction (such as resulting from a co-location experiment) can be applied to data either on the sensor or in the cloud service
AQMesh	Yes, at user programmable intervals	yes, graphical and tabular including Open Air Analytics and mapping.	Yes and web appication is SSL encrypted.	Yes by API	Raw sensor data is not available or indeed useful. The algorithms applied are necessary to determine correct concentrations with compensation for temperature, humidity and cross gas interferences. All algorithms are fixed, transparent and traceable and there is no machine learning applied.

Kunak sensor box	You can configure the sending period of the unit to a database remotely between 5 minutes and a 24h.	Yes, there is, you can see it (as a table, as a graph or in the dashboard) in our software. Then you can download them in a CSV or Text format. Advanced analytics with OPEN AIR are also available, as well as validation tools and reports. More info ⁴ .	Yes, the data is owned by the end user. Data access can be managed from the management section of the cloud. Different access restrictions can be configured when creating new accounts. The software is very powerful, with different permissions, tools, etc.	Yes, it can be transferred by an open API REST. (not directly from sensorbox to client database)	Black box. However, if required by the end user, we can provide with a firmware version just with milivolts information from gas sensors if the end user wants to design their own data processing algorithms, etc.
Airsenseur	Data is stored locally into a sqlite3 formatted database. The provided microSD is 16GB and the OS requires less than 3GB. This left more than 10GB for data retention. With a sampling period of 1 minute (CO2, Temperature, Humidity, Pressure), 2 minutes (PM) and 18 seconds (each Chemical sensors) and all raw data collection enabled, the local database is expected to grow 250MB/month. This is equivalent to 3GB/Year. This allows for a theoretically up to 3Years on the single microSD but no more than a Year has never been tested.	Data visualization is implemented by third-party open source software and highly depends on the technology used for data storage on the server. AirSensEUR is compatible with InfluxDB and 52North SOS DB. For Influx DB, the main visualization program is the web-based Grafana, 52North SOS DB integrates its own web-based data graph tool.	Data may be encrypted, if required, by means of HTTPS protocol or VPN (this latter requires networking and Linux knowledge to be implemented).	Data available to the remote database may be exported locally for data post-processing. This can be done by means of open source third-party libraries. Each AirSensEUR box is able to periodically upload local data to remote servers with no user intervention, so, all sampled data are available to remote servers as soon as the unit "pushes" to it.	Yes. Data may be stored on user's server. AirSensEUR may push data to whatever InfluxDB or 52North SOSDB server accessible over the network. It's not mandatory to use LiberaIntentio servers: they are pre-defined only for allowing to a quick-start for people approaching to the AirSensEUR Open Platform for the very first time. If users have the right expertise, they can set-up their own server and allows AirSensEUR to point to for data pushing. Calibration and data correction procedures are available as Open Source on the JRC repositories. They're in form of R sources.

⁴ <https://www.kunak.es/en/products/ambient-monitoring/air-quality-and-noise-software/>

AQY	WIFI, 3/3.5/4G cellular modem	Runs on secure 'cloud' servers, accessed via web browser. Features: configuration, diagnostics, journal, calibration and data acquisition, plus SMS and email alerts, auto data export via FTP and email, and data export API	n/a	FTP, API	Yes
Cairnet	Yes, Cairnet mini-station is autonomous and send the 1-minutes averaging data of all embedded micro-sensors to the Caircloud database. The transfert frequency is can by set from 1 minute to 30 minutes, by default is set to 10 minutes.	Yes, Caircloud is a fully secured web-based interface access with any support (PC, smartphone, tablet ...).	Yes, database is hosting in our servers and thte data accessible only by the user with its access.	Data transfer from database to client database. No direct transfer form sensorbox to client database.	Yes, the micro-sensors measurements are available directly in Caircloud (software platform developed by our – iseo IT division of ENVEA Department).
POM	No	Screen on POM, serial connection to PC with data visualisation	Yes	Cable	Yes
Praxis	Yes, either a nice graph or raw voltages can be given, see it as it happens on the graph is best option.	Yes	100%, although we at SCS will be able to see & monitor it, if you do your own thing with the data, then we have no way of monitoring it, your call.	Yes	Raw data & no black box, although you need to understand the raw voltages or it would be considered black box, but as your asking the questions, you clearly have an understanding, so to you, it will be completely transparent.
AirVeraCity	We transmit data every 4 minutes but this is configurable.	We have a mobile app that will give you values in real-time or you can see the OpenStreet or other graphical visuals on a PC in	Yes this can be guaranteed, but our preference is to work on an Open Data principle. If the question is around	Yes	This can be provided. Yes raw and calibrated data can be made available.

		real-time as seen in the videos.	data security our default communication is HTTPS protocol. We can offer virtually any level of security required.		
PAll	PurpleAir sensors require continuous access to power and WiFi and will need to be configured to a WiFi network and registered to the PurpleAir network to access the data on the PurpleAir map and download data from the data cloud.	PurpleAir map and download data	You can register sensors as private so the data is not available on the public network.	You add any http server as a data processor when you register the sensor to send raw data to a third party server in addition to PurpleAir.	Yes
PATS+	No, local storage on SD	Logger software	n/a	Yes	Yes
MetOne (E-sampler)	Remote data retrieval possible (GSM connection)	Dedicated MetOne software	To local database of user	Yes	Yes
SCI - 608	Data is transferred to the cloud in real time	Yes there is a software visualization package.	We do take measures to secure the privacy of the data.	Technically yes, but I do not recommend. Because there are lots of things we can not control. And, we cannot guarantee the data quality.	Raw data can be available, however access to it increases the data subscription costs.
Airly	GSM	Yes	n/a	n/a	n/a

5.2.4. KOSTPRIJS

Tabel 13: Antwoorden op vragen m.b.t. kostprijs van sensorbox en uitbouw netwerk.

	Kostprijs sensorbox	Licentie	Netwerk kost	Operationele kost
AQT410	• 4 gases + PM2.5/10 – single unit list price for sensor box 4900 € • 4 gases – single unit list price for sensor box 2900 € • Plug-in cellular data gateway for connection to Cloud service 1000 €	no	Ca. 20 kEUR	• EC cell + particle filter replacement kit 950 € every 18-36 months • Can be done locally but not in the field (ie to be done in a local repair depot or equivalent). Working time for replacement work 1-2 h / system.
AQMesh	Varies with volume and number and type of pollutants. Starts at €3k up to €10k	There is a cost for communications via cellular and a small annual fee to access the data by API and an option to access high level analytical software applications.	Cost would be approx €18k	less than €200 per device per year.
Kunak sensor box	The cost varies depending on the desired configuration. It can be between 3,200€ (with one gas or PM, temperature, pressure and humidity) and 7,100€ (with 4 gases, PM10, PM2.5, PM1, temperature, anemometer, pressure and humidity).	Yes, there is an annual license cost and it varies, depending on the permits, from 200 to 600€.	It will cost, more or less, 5,500€ including the hardware, the software and the communications for a year.	Depends on the table above, but let's say always less than 1000€ a year

	Communication can be via GPRS, 4G, RS232 or Ethernet. Mains power supply or solar panel + batteries.			
Airsenseur	A single unit equipped with: - CO, NO, NO2, O3, CO2, PM1, PM2.5, PM10 (OPC-N3), Temperature, Humidity and Pressure sensors; - GPS - GPRS and WiFi - Battery backup - 230V Power supply - PTFE enclosure for indoor use - Stainless steel cover box for outdoor use - 1Y complementary service for data retrieval (InfluxDB with no warranty on data backup) Is in the range of 2500,00 EUR.	No. Absolutely.	Prototypes are sold with a complementary 1 Year service for data retrieval (InfluxDB with no warranty on data backup). Three units are sold in the range of 7500,00EUR. Costs associated to data transfer via mobile operator are not included. Monthly data transfer is estimated in 1GByte/month. Power supply consumption is in the range of 3 to 5W.	As soon as units are installed and left operational, costs are related only to data analysis processing. For chemical sensor replacement and standard maintenance, a couple of hours is needed. Due to the youngness of the project, some interventions may be required to upgrade the software into the units. This is, unfortunately, not predictable and highly depends on the type of problem found/fixed by the software.
AQY	3500 EUR	Included in the price a 2 years licence for 'AQY-Care'. AQY-Care is a support package that includes access to our tech assistance (email/phone), with the 2 way comms capability it means our team can remotely	n/a	Replacement PM Sensor EU€170 (less 30% if you have AQY Care)

		monitor and troubleshoot and assist your team. AQY-Care also includes access to the Aeroqual Cloud (demo access below). This will enable you to remotely monitor the health of all units you have deployed and includes unlimited data storage and back up. More information about 'Connect' & 'Cloud' can be found at https://www.aeroqual.com/wp-content/uploads/Aeroqual-Connect-and-Cloud.pdf.		- Replacement NO2/O3 Sensor EU€515 (less 30% if you have AQY Care) - Useful Sensor life* is dependent on the environment it is in, but as a rough guide where PM10 (ug/m3) is 0-50 we expected 10 – 14 months, and where it is 151-200 we would expect 4 – 8 months (*Useful Sensor Life means the time from installation until the point at which the sensor can no longer be remotely calibrated).
Cairnet	The typical price are for: - Cairnet housing: 3210 € - Caicloud is included for the first year - Power Supply Of The Cairnet Station For Outdoor Uses - Solar panels: 591€ - Outdoor main power supply 115-220VAC / 12 VDC: 598€ - Micro-sensors; it depend of the measured pollutant for example:	- No Liccence to use the system, Caicloud is included for the first year. - After one year of use, yearly fees for data base maintenance and hosting for Caircloud software are due: 200€/Caicloud account / year.	- The price for the complete equipment is : 20 280 € 3 x Cairnet housing 1 x Caircloud for data management 3 Cairsens micro-sensors (NO2, O3/NO2 and PM) with calibration certificate traceable to reference analysers 3 Solar panels kits 3 x mounting kits based on fixed support	- Man power is generally not require during the operation. The replacement price for the following concerned equipment is : 6 114 € 3 x Cairsens mciro-sensors (NO2, O3/NO2 and PM) 1 x yearly fees for data base maintenance and hosting for Caircloud software are due: 200€/Caicloud account / year.

	• NO2 Cairsens: 715 € • O3/NO2 Cairsens: 791 € • PM Cairsens (simultaneous measurements of PM10, PM2.5 & PM1), calibrated optical sensor: 1 310 €. • The mounting kits: • Fixed support (stainless tube D28mm - H1,50m - ep 1.5mm) : 143 € • Mobile support : tripod, easy to deploy: 342€			
POM	Contact repress. Belgium			
Praxis	Praxis Urban 5000 Euros, data costs, depends on usage, but not too different from running a low cost mobile phone contract.	I will send you a separate sheet to help illustrate this if the above answers are of interest, please advise.	15 kEUR plus other costs inc VAT & Deliveries. etc	From the answers above that should answer this question, replacement parts etc N/A, our kit is covered by 12 month warranty, and have only had one Praxis returned for a failure that I am aware of, so not really an issue.
AirVeraCity	Our standard offer for a stationary sensor with default modalities is an annual lease for \$10k which we will guarantee	No license is involved but our core strength is mobility and accuracy. Our focus is to deploy a mobile array of air pollution sensors on municipal transport. We want to use this to tie the existing reference stations to all	25K per annum including everything and we would include CO as this is necessary to achieve our threshold levels of accuracy.	This is included in the lease price.

	a minimum level of accuracy.	qualifying air pollution sensors in a city. The reason that we are focused on this is because it reflects the reality of urban air pollution and is the cheapest and most effective way to deal with urban air pollution. The cost of this deployment is largely dependent on the amount of on-location work that the municipality asks for us. Our preference is to allow the municipality to do this as it is far more efficient and cost effective.	To be honest, for a city there would be a much greater value in having 2 sensors deployed on a mobile basis and one deployed stationary. The cost to do this depends on the shared costs done by the municipality.	
PAII	229USD	No	Data stored on our data cloud with no subscription fees	n/a
PATS+	PATS+ 500USD PATS+ CO 650USD PICA logger software 150USD Zero calibration unit 95USD	No	No	n/a
MetOne (E-sampler)	5500USD	No	n/a	n/a
SCI - 608	Pricing will depend on the pollutants measured (see the previous question for the options that are available) and the number purchased. A quote for the requested sensor configuration below is attached. Sensorbox with PM2.5, NO2 and O3: 3764 USD	After the first year of operation data access costs (\$500 per sensor node)	20 kUSD	For the first year of operation I would estimate 10 to 15 manhours per sensor node during first year of operation.

Airly	350 EUR	160 EUR	1,2 kEUR	n/a
-------	---------	---------	----------	-----

5.3. SAMENVATTING

De sensorboxen kunnen opgesplitst worden in twee categorieën: (1) sensorboxen voor het meten van uitsluitend PM, en (2) sensorboxen voor het monitoren van gassen en PM. Er is een duidelijk prijsverschil tussen beide. Voor PM sensorboxen ligt de kostprijs van een sensorbox tussen 200 en 500 EUR, en voor een netwerk van 3 sensorboxen tussen 600 en 1600 EUR. Uitzondering hierop is de MetOne sampler die aanzienlijk duurder is (5000 EUR). De kostprijs van sensorboxen die zowel gassen als PM meten ligt hoger. De kostprijs van een sensorbox bedraagt 2500 tot 10000 EUR. De kost om een netwerk van drie sensorboxen op te zetten kan oplopen tot 25000 EUR. De goedkopere systemen zijn de AirSensEUR (maar nog in experimenteel stadium, wel al commercieel beschikbaar, stofsensor niet geïntegreerd) en de AQY van Aeroqual, en vooral de Airly. Van de Airly zijn er jammer genoeg geen testresultaten beschikbaar.

Tabel 14: Samenvattende tabel met resultaten van de marktbevraging.

	Polluenten			Plug and play	Data		Kostprijs	
	NO ₂	O ₃	PM _{2,5}		Draadloze transmissie	Visualisatie	Aankoop sensorbox	Netwerk 3 sensorboxen
AQT410/420	+	+	+	+	+	+	5 kEUR	20 kEUR
AQMesh	+	+	+	+	+	+	3-10 kEUR	18 kEUR
Kunak sensor box	+	+	+	+	+	+	3-7 kEUR	15-25 kEUR
Airsenseur	+	+	+	-	+	+	2,5kEUR	7,5 kEUR
AQY	+	+	+	+	+	+	3,5 kEUR	12 kEUR
Cairnet	+	+	+	+	+	+	6,6 kEUR	20 kEUR
POM	-	+	-	+	-	+	/	/
Praxis	+	+	+	+	+	+	5 kEUR	15 kEUR
AirVeraCity	+	+	+	+	+	+	10 kEUR	25 kEUR
PAII	-	-	+	+	+	+	200 EUR	600 EUR
PATS+	-	-	+	+	-	+	500 EUR	1,6 kEUR
MetOne (E-sampler)	-	-	+	+	+	+	5 kEUR	15 kEUR
SCI - 608	+	+	+	+	+	+	3,3 kEUR	20 kEUR
Airly	+	+	+	+	+	+	350 EUR	1,2 kEUR

Op de stuurgroepvergadering van 6/02/2020 werd gevraagd om extra aandacht te besteden aan de visualisatie. Voorbeelden van visualizaties van enkele systemen zijn terug te vinden in Bijlage B.

Met het oog op de cases is bijkomende info over het gebruik van zonnepanelen erg nuttig (cfr. stuurgroepvergadering van 6/02/2020). In Tabel 15 wordt aangegeven voor welke systemen er een zonnepaneel wordt aangeboden voor stroomvoorziening.

Tabel 15: Stroomvoorzieningsmogelijkheden voor een selectie van sensorboxen.

	stroomvoorziening	
	netstroom	zonnepaneel
AQT410/420	+	-
AQMesh	+	+ (20W, kan 2 sensorboxen van stroom voorzien)
Kunak sensor box	+	+
Airsenseur	+	-
AQY	+	+ Solar and battery power is possible though not currently available as a factory-standard option.
Cairnet	+	+
POM	-	-
Praxis	+	-
AirVeraCity*	?	?
PAII	+	-
PATS+		-
MetOne (E-sampler)	+	+
SCI - 608	+	+
Airly	+	+

* Systeem dat op een bus gemonteerd wordt. Geen gegevens beschikbaar maar vermoedelijk stroom van batterij van de bus. Er zijn geen gegevens over bruikbaarheid van het systeem in stationaire toepassing

HOOFDSTUK 6. MULTI-CRITERIA ANALYSE

Doel van de multicriteria-analyse (MCA) is om een afweging te kunnen maken tussen verschillende (technische- en financiële) vereisten van de sensoren of sensorboxen in functie van de beoogde toepassing.

Doel van de MCA is om verschillende criteria die belangrijk zijn bij de keuze van de sensor of sensorbox, te kunnen afwegen. Uiteraard hangt de manier waarop verschillende criteria tegenover elkaar worden afgewogen en het gewicht dat aan elk van deze criteria gegeven wordt af van de beoogde toepassing. Bovendien kan er voor criteria een wisselwerking bestaan: goedkopere sensoren die minder nauwkeurig zijn of minder gebruiksvriendelijk.

Bij de MCA stellen we voor om onderscheid te maken tussen exclusie-criteria en differentiërende criteria. De eerste zijn voorwaarden waaraan voldaan moet zijn. De differentiërende criteria kunnen een verschillend gewicht hebben wat afhankelijk kan zijn van de toepassing.

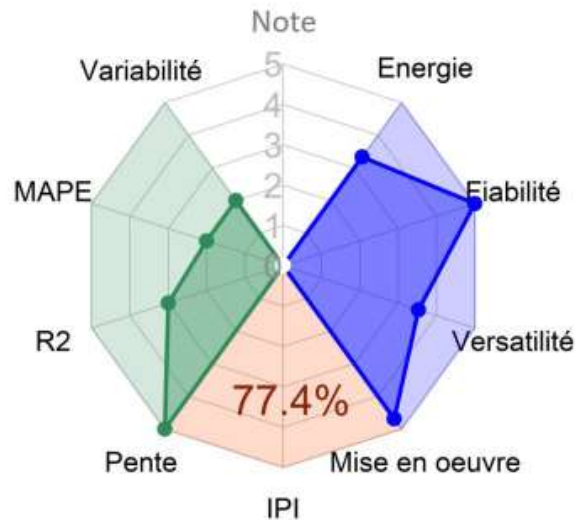
In de literatuur zijn er al MCA te vinden, we baseren ons hierop om een eigen analyse te maken. De MCA houdt ook rekening met de beoogde toepassingen en de technische en financiële vereisten die bepaald werden in een workshop met steden en gemeenten.

6.1. BESTAANDE SYSTEMEN

Fishbain et al., 2017 hebben een 'evaluatie toolkit' opgesteld voor luchtkwaliteitssensoren; de set bestaat uit acht evaluatiecriteria: RMSE, Pearson, Kendall en Spearman correlatie en daarnaast ook parameters die aangeven in welke mate een sensor in staat is om lokale bronnen te identificeren, pollutieniveau op een brede schaal in kaart te brengen en een hoge temporele variabiliteit in kaart te brengen. De auteurs evalueren sensoren gebruikt in een welbepaalde meetopzet in uitgevoerde projecten en niet los van de meetopzet die gebruikt werd; zo kan de parameter die bepaalt in welke mate lokale bronnen geïdentificeerd kunnen worden negatief beïnvloed worden door de foutieve meetopstelling; in deze studie willen we enkel de sensoren en boxen beoordelen. De onderlinge vergelijkbaarheid tussen sensoren kan een parameter zijn om aan te geven in welke maten bronnen geïdentificeerd kunnen worden.

Ook **Rai et al., 2017** hebben een evaluatie gemaakt van sensoren op basis van verschillende eigenschappen, waarbij ze gebruikersvereisten tegenover sensorkarakteristieken hebben uitgezet en aanbevelingen geven op basis van meta-data. De sensorkarakteristieken die beoordeeld werden zijn: stabiliteit, impact van omgevingsfactoren, detectielimiet, herhaalbaarheid (herhaalde metingen van eenzelfde sensor) en reproduceerbaarheid (onderlinge verschillen tussen sensoren), kostprijs.

Ook **Spinelle et al. 2018** hebben een evaluatietool gemaakt waarbij kwalitatieve en kwantitatieve parameters worden afgewogen. De kwalitatieve criteria zijn: energievoorziening (energiebron, hernieuwbare energie, autonomie), betrouwbaarheid (data-capture), installatie, flexibiliteit (op vlak van datavisualisatie, connectiviteit, toegang tot data, gemeten parameters). De kwantitatieve criteria zijn: variabiliteit, R^2 en helling van regressierechte, MAPE (Mean Absolute Percentage Error). Daarnaast rapporteren ze ook de IPI (Integrated Performance Index zoals voorgesteld door Fishbain et al., 2017).



Figuur 14: Evaluatieradar zoals voorgesteld door Spinelle et al. 2018 (bron: persoonlijke communicatie en ontwerp-rapport)

6.2. OVERLEG MET DE STUURGROEP

In samenspraak met de stuurgroep werden een aantal criteria besproken. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen kwalitatieve en kwantitatieve criteria. Daarenboven zijn er een aantal minimale vereisten of exclusiecriteria die essentieel zijn voor een bepaalde case.

- Kwalitatieve criteria :
 - Energievoorziening (netstroom/batterij), installatiegemak (plug and play: j/n, speciale vereiste voorkennis?), connectiviteit (type), data-acquisitie (lokaal, datakaart, webserver,...)
 - Flexibiliteit voor gebruiker (sensoren, data-acquisitie, connectiviteit, meetfrequentie)
 - Kostprijs, recurrente kost
- Kwantitatieve criteria:
 - Lineariteit (R^2) en afwijking ten opzichte van referentie (helling regressielijn): focus veldtesten
 - Inter-sensor variabiliteit (optioneel: AQ-SPEC data)
 - Detectielimiet (-> eventueel uit specs of range?)
 - Stabiliteit (-> niet zoveel data voor alle sensorsystemen)

- Interferenties (T, RH, andere polluenten) (-> kwalitatief aangeven: ja/nee of ?)
- Minimale vereisten/exclusiecriteria:
 - aanwezigheid of mogelijkheid tot integratie van RV en T sensor
 - open data principe

6.3. WORKSHOP STEDEN EN GEMEENTEN

Tijdens de workshop met steden en gemeenten werden fiches opgemaakt voor samplers, sensoren, sensorboxen en monitoren waarbij een aantal criteria gespecificeerd werden, m.n.:

- Prijs
- Aantal polluenten
- Plug & Play
- Technische kennis
- Recurrente kost
- Levensduur
- Frequentie
- Kwaliteit

Er werd ook flow uitgewerkt om concrete concepten te beschrijven (Figuur 15).

BEPALING CONCRETE CONCEPTEN



Figuur 15: Flow voor de concrete bepaling van concepten.

In de derde stap “Type sensor” wordt een keuze gemaakt op basis van sensor karakteristieken in functie van de geaffecteerde zone. Sensor karakteristieken die hierbij in rekening gebracht worden zijn hierboven gegeven. De keuze van sensor wordt verder bepaald door de toepassing, hier gedefinieerd vanuit de geaffecteerde zone (stap 2). Parameters die daarbij vastgelegd worden zijn:

- Tijdsperiode beschikbaarheid resultaten
- Visualisatie resultaten
- Tijdsresolutie
- Afwijking op de metingen
- Types gemeten stoffen
- Aantal meetpunten per gemeente.

6.4. UITWERKEN SELECTIETOOL OP BASIS VAN MULTICRITERIA ANALYSE

De selectietool stelt een gebruiker in staat om uitgaande van een specifieke case een overzicht te bekomen van bruikbare systemen en informatie te verstrekken die de gebruiker in staat stelt om de beste keuze te maken.

De opmaak van een selectietool maakt geen onderdeel uit van deze opdracht. Hieronder worden richtlijnen gegeven die kunnen opgenomen worden in de selectietool.

De vorm waarin het resultaat van de MCA voorgesteld wordt werd besproken tijdens de stuurgroepvergaderingen. In eerste instantie wordt een overzicht in tabelvorm beoogd, waarbij sensorsystemen (rijen) beoordeeld worden op basis van verschillende criteria (kolommen). De sensorsystemen kunnen gerankt worden door de gebruiker op basis van de prestatiekenmerken op een bepaald criterium (bv. ordenen op basis van prijs). Op basis van gesprekken tijdens stuurgroepvergaderingen werd beslist om geen geïntegreerde index te gebruiken waarbij elke sensorbox enkel op basis van 1 geïntegreerde waarde wordt beoordeeld. De hier voorgestelde aanpak is transparanter en kan later verder uitgewerkt worden; dit kan gebeuren door per toepassing een gewicht en waarde toe te kennen aan de individuele vereisten, welke dan geïntegreerd worden in 1 score op basis van een gewogen gemiddelde van de scores en gewichten per vereiste.

De selectietool kent een stapsgewijze opbouw.

In eerste instantie worden de minimale vereisten bepaald. De minimale vereisten geven aanleiding tot exclusie van een aantal sensorboxen, die niet weerhouden worden in de verdere selectie. In tweede instantie worden enkele belangrijke kwalitatieve en kwantitatieve criteria ingevuld om tot de verdere selectie te komen. Die selectie wordt in tabelvorm weergegeven, en stelt de gebruiker in staat om een vergelijking te maken en tot een finale selectie te komen.

- ▶ Polluent(en) (multiple selectie mogelijk) -> minimale vereiste
 - NO₂
 - O₃
 - PM
- ▶ Extra parameters
 - T
 - RV
- ▶ Plug and play

- Ja/nee
 - Weersbestendige behuizing
- ▶ Connectiviteit
 - Draadloos/bekabeld
- ▶ Energievoorziening
 - Netstroom/autonoom (batterij, zonnepaneel)
- ▶ Data logging
 - Lokaal/cloud
- ▶ Kostprijs (sensorbox)
 - Max. ingeven
- ▶ Kwaliteit metingen
 - R^2 (categorie)

6.5. CASES

Hier onder wordt een overzicht gegeven van de drie cases die voorliggen. Mogelijks worden er twee van de drie weerhouden. De concrete uitwerking van de cases is niet de bedoeling hier. Het doel is om op basis van de gegevens in het rapport de deelnemende gemeenten in staat te stellen om een voldoende gedetailleerd bestek uit te werken voor hun specifieke case.

6.5.1. CASE IN KAMPENHOUT: SCHOOLOMGEVING

→ Beschrijving

De beschrijving van de case werd overgenomen uit het gedeelde document *case kampenhout schoolomgeving.docx*.

Het doel van de case bestaat te onderzoeken wat de beste aanpak is om de luchtkwaliteit rondschole te verbeteren. Hiervoor wordt gedurende **3 maanden** een **5-tal sensoren** geplaatst in de omgeving van de school: 1 ter hoogte van de ingang (elektriciteit en wifi via school) 2 op 10 m van de school (in beide richtingen) (afhankelijk van de school mogelijk nog elektriciteit/wifi mogelijk) 2 op het 1e kruispunt (in beide richtingen), **deze sensoren kunnen geen elektriciteit/wifi ontvangen** via de school. In de eerste school wordt 1 van de meetpunten voorzien om de hoek in de Van Bellingenlaan, de school bevindt zich immers op de hoek, en tijdens de resultaten van AirQmap bleek de luchtkwaliteit hier opvallend slechter. Na 3 maanden worden de sensoren verplaatst naar de volgende school. Per school verlopen de 3 maanden als volgt: -1 maand meten. Op het einde van de maand worden de ouders uitgenodigd om de resultaten te tonen, hieruit zal telkens een duidelijke piek zichtbaar zijn in **NOx, fijn stof, roet** rond de beginnende uren van de school. -De ouders worden gevraagd gedurende maand 2 geen gebruik te maken van de fiets en niet voor de deur te parkeren en de auto niet stationair te laten draaien tijdens het wachten in/en uitstappen. Om de afwezige ouders ook te bereiken wordt dit ook gecommuniceerd via smartschool -Op het einde van maand 2 wordt opnieuw gecommuniceerd over de resultaten. -Maand 3 ten slotte wordt de schoolstraat ingericht. Het verkeer mag niet door het deel van de straat waar de school zich bevindt. Op het einde van maand 3 wordt opnieuw gecommuniceerd met de ouders. Afhankelijk van de resultaten kunnen nadien keuzes gemaakt worden, deze kunnen

verschillen van school tot school. Afhankelijk van de resultaten van de AirQmap metingen, curieuzeneuzen en het aantal leerlingen, wordt een prioritering gemaakt en wordt de volgorde van scholen waar zal gemeten worden vastgelegd: De **resultaten moeten makkelijk afleesbaar zijn via een grafiek**, liefst automatisch uitgelezen, zodat we die op het eind van de maand rechtstreeks kunnen tonen en continu meten, of telkens om een zeer beperkt tijdsinterval, zodat de piek door het verkeer bij het begin en einde van de schooluren duidelijk zichtbaar wordt.

Op basis van e-mail van 20/02/2020 werd de case van Kampenhout iets aangepast:

We hebben gekozen om de situatie uit te werken voor de parkschool.
Hier passeert ook veel sluipverkeer dat het kruispunt aan kampenhout-sas probeert te vermijden.

We zouden daarom als volgt willen werken:

- 1 gewoon meten
- 2 doorgaand verkeer weren (knip)
- 3 schoolstraat

De meettoestellen komen dan telkens aan een verlichtingspaal: 1 aan de schoolpoort, 1 aan de parking waar de ouders naartoe gestuurd worden als de schoolstraat is ingevoerd, en 1 aan het kruispunt waar het doorgaand verkeer wordt omgeleid.

(indien nog een 4^e beschikbaar zou zijn, zouden we die ook aan de spectrumschool willen hangen, want die ligt verder op de sluipverkeerroute en mogelijk leidt de knip voor het doorgaand verkeer daar ook tot een grote verbetering. Dit is nl de school met de slechtste luchtkwaliteit, maar een schoolstraat is hier niet mogelijk)

Het komt er dus op neer: aan verlichtingspaal dus geen elektriciteit en geen wifi beschikbaar.

→ **Overzicht vereisten**

Polluenten	NO ₂ PM _{2,5} Roet -> niet opgenomen in sensorbox, off-line wel mogelijk
Duur	3 maanden
Locatie	Outdoor, weersbestendig
Elektriciteit	nee
Communicatie	nee
Tijdsresolutie	Niet opgegeven Minuut
Kwaliteit metingen	Hoog kwalitatief Goede vergelijkbaarheid tussen sensorboxen Vergelijking scenario's met veranderde mobiliteit
Visualisatie	Data te bekijken in grafiek Niet noodzakelijk in real-time Data-analyse/visualisatie om veranderende condities in rekening te brengen die impact hebben op de gemeten concentraties, los van de interventie

→ **Selectie**

De meest kritische selectiecriteria zijn:

- Stroomvoorziening:
 - Er is op geen enkel meetpunt netstroom beschikbaar. Er zijn twee opties:
 - Batterij: beperkte levensduur (meestal < 1 dag), uitzondering PATS+ (> 80 uur, uitbreidbaar) maar dat systeem meet enkel PM (geen NO₂)
 - Zonnepaneel: beschikbaar voor de duurdere systemen (bv. AQMesh, Kunak, Waspote Plug & Sense!), tot 10 kEUR per sensor node.
- Datacommunicatie:
 - WIFI niet beschikbaar
 - GSM communicatie, optioneel in meeste systemen
- Polluenten:
 - Enkel PM: goedkopere systemen
 - NO₂ plus PM: dure systemen
 - Roet: niet opgenomen in dit overzicht (in ontwikkeling, zie <https://aethlabs.com/microaeth/ma350/overview>)
- Kwaliteit sensor metingen:
 - Voor NO₂ is de R² maximaal ca. 0,8 op basis van vergelijking met referentie op 5-min basis.
 - Bijkomend risico op grote verschillen tussen sensorboxen -> co-locatie metingen noodzakelijk
 - Voor PM metingen is de kwaliteit beter (R² meestal > 0,7 in vergelijking met referentie op 5-min basis)
 - Voor PM is de vergelijkbaarheid tussen sensoren variabel, soms goed, soms slecht -> colocatie metingen noodzakelijk

In wordt een overzicht gegeven van sensorboxen met pro's en contra's voor gebruik in deze specifieke case.

Tabel 16: Oplijsting selectie criteria voor de case in Kampenhout en prestaties van sensorboxen.

Naam	Polluent(en)		Weerbestendig	Meetfrequentie	Stroom			Datacommunicatie		Kwaliteit (R ²)		Visualisatie	Kostprijs
	NO ₂	PM _{2,5}			net	batt	zon	WIFI	GSM	NO ₂	PM _{2,5}		
				1 minuut									Indicatief (5 SB)
AQMesh	+	+	+	+	+	+	+	-	+	0,04 tot 0,45	0,26	+	30 kEUR
Kunak sensor box	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0,25 tot 0,33	0,55 tot 0,72	+	30 kEUR
AQT	+	+	+	+	+	+	-	+	-	0,43 tot 0,61	n/a	+	30 kEUR
AQY	+	+	+	+	+	-	-	+	(+)	0,41 tot 0,56	0,78 tot 0,87	+	18 kEUR (?)
Praxis	+	+	+	+	+	+(2u)	-	-	+	n/a	n/a	+	25 kEUR
Cairpol/cairsens (cairnet system)	+	?	+							n/a	n/a		
AirVeraCity	+	+	+	+	+	+	-			n/a	n/a	+	45 kEUR
SCI - 608	+	+	+	n/a	+	-	+	-	+	n/a	n/a	+	25 kEUR
Airly	+	+	+	n/a	+	-	+	+	+	n/a	n/a	+	2 kEUR
Plug 'n sense	+	+	+	+	+	-(?)	+	+	+	n/a	n/a	-	?
AirSensEUR	+	+	+	+	+	+(1d)	-	+	+	0,89	n/a	-	12,5 kEUR

6.5.2. CASE IN SINT-NIKLAAS: UITROL PROEFPROJECT SENSOREN

De beschrijving van de case werd overgenomen uit het gedeelde document case *Voorstel_proefproject_sensornetwerk_Sint-Niklaas.docx*.

UITROL PROEFPROJECTLUCHTKWALITEITSSENSOREN SINT-NIKLAAS

De afdeling Plannen & Ontwikkelen van de stad Sint-Niklaas wenst een proefopzet ter hoogte van de Grote Markt te realiseren met minimaal 3, maar bij voorkeur 5 sensorboxen.

Waarvoor?

In uitvoering van het mobiliteitsplan zal op termijn een ‘knip’ voor doorgaand verkeer dienen te worden gerealiseerd ter hoogte van de Grote Markt (stadscentrum). Deze ‘knip’ op Grote Markt is het belangrijkste onderdeel van de (op dit moment stapsgewijze) invoering van het stadscirculatieplan.

Als bijkomende trigger voor het beleid om versneld over te gaan tot de invoering van de ‘knip’ is het wenselijk de impact van de verkeerssituatie op de luchtkwaliteit te kennen voor en na de invoering ervan, waarbij kan verwacht worden dat de invoering (en de daarmee gepaard gaande sterke vermindering van de verkeersstroom) een positief effect zal hebben op de luchtkwaliteit. Het proefproject zou dienen als ‘nulmeting’ voor de eigenlijke invoering van de ‘knip’. Het is de bedoeling dat de metingen (op een liefst identieke manier) zouden herhaald worden na de invoering.

Te verwachten resultaten: een slechte luchtkwaliteit ten gevolge van de dagelijkse, drukke verkeersdoorstroming ter hoogte van de Grote Markt en de aansluiting met de voornaamste toeleidingswegen (Parklaan & Plezantstraat). Verkeerscijfers nodig?

Welke sensoren vereist?

NO₂, black carbon wenselijk, fijn stof, luchtvochtigheid, temperatuur, ozon niet direct van toepassing vermits het niet direct over een ‘street canyon’ gaat/Grote Markt = grote openruimte, eventueel toeleidingswegen? 3 sensorboxen verspreid rond de Grote Markt + telkens 1 op de toegangspunten

Gewenste duurtijd van het proefproject

Lang genoeg. Minimaal 2 maand, liefst 3.

Betrokkenheid van de burger

Bij het ontwerpproces voor de invoering van de ‘knip’ zal een grootschalig participatietraject met de burger worden opgezet. De verwerkte resultaten van de luchtkwaliteitsmetingen (nulmeting) zullen worden meegenomen in het luik ‘probleemstelling’ van het participatie traject. Het is niet de bedoeling een real time visualisatie voor de burger te voorzien bij de nulmeting.

→ **Overzicht vereisten**

Aantal sensorboxen	Minimaal 3, liefst 5
Polluenten	NO ₂ PM _{2,5} , PM ₁₀ Roet -> wenselijk
Duur	Liefst 3 maanden (min. 2)
Locatie	Outdoor, weersbestendig
Elektriciteit	?
Communicatie	?
Tijdsresolutie	Niet opgegeven Minuut
Kwaliteit metingen	Hoog kwalitatief Goede vergelijkbaarheid tussen sensorboxen Vergelijking scenario's met veranderde mobiliteit
Visualisatie	Geen real-time visualisatie voor burger Wel snelle opvolging door stad wenselijk

→ **Selectie**

Te bespreken in de stuurgroep.

6.5.3. CASE SCHOTEN: SENSOR UITROL

Voorstel_sensor uitrol_Schoten.docx

UITROL SENSOREN

De milieudienst van de gemeente Schoten wenst gebruik te maken van minimaal 3, maximaal 5 sensoren.

Eén van de sensoren wordt al zeker geplaatst aan het referentiemeetstation van de VMM in de Lodewijk Weijtenstraat. De data die voortvloeit hieruit kan gebruikt worden om het algoritme van de sensor te verfijnen.

Twee andere punten die ideaal zijn om de sensor te testen zijn de Verbertstraat en de Horstebaan in Schoten. De eerste straat is een zogenaamde street canyon. De concentraties die worden gemodelleerd door het RIO-interpolatiemodel van de VMM zijn hier vrij hoog (sommige stukkenspreken van een jaargemiddelde van meer dan 45 µg/m³). Uit de analyse van de straatvinken blijkt dat deze straat eveneens vrij belast is door verkeer (542 pae/uur). De Horstebaan is weliswaar geen street canyon maar een straat met veel passage. Uit de straatvinken-analyse bleek dat er erg veel verkeer langskwam (1571 pae/uur) met een slechte score voor de modal split.

Recent heeft de gemeente echter een deelfietsenproject opgesteld met een station aan het einde van de Horstebaan om de ontsluiting met het openbaar vervoer te verbeteren en zo

de modal split te verhogen. In de straatvinkenanalyse van 2018 bleek dat de Horstebaan in de top 3 stond van straten met de hoogste verkeersbelasting.

Twee andere sensoren kunnen eventueel nog gebruikt worden in de Paalstraat (861 pae/uur) en de Wijnegembaan (815 pae/uur) in Schoten. Een andere optie om de twee sensorboxen te gebruiken is één aan een school waarbij een deel van de straat is afgesloten van verkeer voor de schoolgaande jeugd en een andere aan een vergelijkbare school waarbij dit niet het geval is. De sensorboxen zelf zijn, bij voorkeur, samengesteld uit de volgende sensoren (fijn stof uitgedrukt in PM_{2,5}, luchtvochtigheid, temperatuur, NO₂ en indien mogelijk black carbon).

→ **Overzicht vereisten**

Aantal sensorboxen	Minimaal 3, liefst 5
Polluenten	NO ₂ PM _{2,5} Roet -> wenselijk
Duur	?
Locatie	Outdoor, weersbestendig
Elektriciteit	?
Communicatie	?
Tijdsresolutie	? Minuut
Kwaliteit metingen	?
Visualisatie	?

HOOFDSTUK 7. BESLUIT

Gemeenten willen op een innovatieve manier invulling geven aan luchtkwaliteitsmetingen in een slimme gemeente met behulp van een sensornetwerk van betaalbare sensoren.

Het doel van het City of Things project is het verwerven van de noodzakelijke kennis rond het opzetten van een sensornetwerk voor luchtkwaliteitsmetingen, met name het in kaart brengen van de nodige technologische vereisten op het vlak van hardware en software, alsook het inzicht verkrijgen in de communicatie van de meetresultaten. Verder wordt bekeken hoe de gegevens op het niveau van een gemeente of stad (klein tot middelgroot) kunnen gebruikt worden en wat dit betekent voor specifieke vereisten van het sensornetwerk aan de hand van een aantal testcases. Met deze opdracht willen de gemeenten zicht krijgen op de stand van zaken van de beschikbare kennis over sensoren en sensorboxen en de beschikbaarheid van sensor(box)en. Op basis van deze opdracht moeten ze een gefundeerde selectie kunnen maken van sensor(box)en voor bepaalde toepassingen.

Er is een verschil tussen sensoren en sensorboxen. Sensoren zijn de detectoren die de concentratie van luchtpolluent(en) meet. Een sensorbox is een geïntegreerd sensor systeem bestaande uit een sensor die in een beschermende box gemonteerd is en voorzien is van eventueel een pomp, stroomvoorziening, elektronica, software voor data collectie, data behandeling en data transfer (of bepaalde onderdelen hiervan).

Uit overleg kwam naar voor dat voor steden en gemeenten de geïntegreerde sensorboxen het meest interessant zijn om een netwerk uit te bouwen omdat de benodigde functionaliteiten voor stroomvoorziening, data behandeling en transmissie aanwezig zijn. Echter, er is geen gestandaardiseerde opbouw van sensorboxen. Sensorboxen van verschillend merk of type maken gebruik van verschillende sensoren en technologieën voor stroomvoorziening en data behandeling. Als gevolg zijn bepaalde sensorboxen minder goed of beter geschikt voor bepaalde toepassingen. Om die keuze te kunnen maken op een gefundeerde manier wordt in dit rapport een overzicht gegeven van sensorboxen. Op basis van het voortraject van deze studie werd door steden en gemeenten de focus van dit overzicht afgebakend.

- **Doel:** opzetten luchtkwaliteitsmeetnetwerk
- **Polluenten:** NO₂, O₃ en PM_{2,5}
- **Criteria:** specificaties, kwaliteit metingen, kostprijs

Nationaal en internationaal zijn er lopende initiatieven om testprotocols uit te werken om inzichten te verwerven in de datakwaliteit van sensorboxen. Een overzicht van de belangrijkste activiteiten hier zijn besproken in dit rapport. Slotsom hier is dat er momenteel geen gestandaardiseerd testprotocol bestaat, terwijl dat wel waardevol zou zijn om een betere vergelijking tussen sensorboxen te kunnen maken. Er zijn wel initiatieven om dit te ontwikkelen. Voorlopig worden de testen en rapportering van AQSPEC als meest bruikbaar ervaren om de kwaliteit van metingen te beoordelen omdat zij relevante parameters kwantitatief op een vrij uniforme manier weergeven. Andere initiatieven geven de voorkeur aan een score-systeem waarbij naast data kwaliteit nog

andere criteria meegenomen worden. De integratie van scores op die verschillende onderdelen in een geïntegreerde index kan nuttig zijn om systemen te ranken, maar wordt toch niet erg informatief bevonden. Als gebruiker wil je weten hoe een bepaalde score tot stand komt, waar de sensorbox goed scoort en waar slecht. Het gebruik van categorieën is hier ook niet altijd even duidelijk.

Op basis van literatuuronderzoek werden tabellen opgesteld waarin technische specificaties en de kwaliteitsbeoordeling van een groot aantal sensorboxen is opgenomen. Uit literatuuronderzoek blijkt dat er vaak een vrij grote range is in gerapporteerde kwaliteitskenmerken voor eenzelfde sensor(box). Bovendien kan de gerapporteerde prestatie afhangen van de testcondities, die voor de verschillende sensorboxen (onder veldcondities) niet altijd dezelfde zijn. Ook de parameters die gebruikt worden om kwaliteit van sensordata uit te drukken kan verschillen; de meest gerapporteerde parameter om de kwaliteit van sensormetingen weer te geven in de literatuur is de overeenkomst tussen sensordata met referentiemetingen uitgedrukt als R^2 en eventueel helling en intercept van de regressielijn.

Om een selectie te kunnen maken van sensorboxen werd een gerichte bevraging gedaan bij de leveranciers om meer inzicht te krijgen in specificaties, operationele vereisten, data transmissie en visualisatie en kostprijs.

Uit de analyse blijkt dat de sensorboxen kunnen opgesplitst worden in twee categorieën: (1) sensorboxen voor het meten van uitsluitend PM, en (2) sensorboxen voor het monitoren van gassen en PM. Er is een duidelijk prijsverschil tussen beide. Voor PM sensorboxen ligt de kostprijs van een sensorbox tussen 200 en 500 EUR, en voor een netwerk van 3 PM sensorboxen tussen 600 en 1600 EUR. Uitzondering hierop is de MetOne sampler die aanzienlijk duurder is (5000 EUR), maar dit is eerder een monitor dan een sensor. De kostprijs van sensorboxen die zowel gassen als PM meten ligt veel hoger. De kostprijs van een sensorbox bedraagt 2500 tot 10000 EUR. De kost om een netwerk van drie sensorboxen op te zetten kan oplopen tot 25000 EUR. De goedkopere systemen zijn de AirSenseEUR (maar nog in experimenteel stadium, wel al commercieel beschikbaar) en de AQY van Aeroqual, en vooral de Airly. Van de Airly zijn er jammer genoeg geen testresultaten beschikbaar. Onderstaande tabel toont de criteria van een aantal geselecteerde sensorboxen. De selectie van de sensoren die in de tabel zijn opgenomen gebeurde voornamelijk op basis van literatuuronderzoek en bijkomende info van Joint Research Center in Ispra.

	Polluenten			Plug and play	Data		Kostprijs	
	NO ₂	O ₃	PM _{2,5}		Draadloze transmissie	Visualisatie	Aankoop sensobox	Netwerk 3 sensorboxen
AQT410/420	+	+	+	+	+	+	5 kEUR	20 kEUR
AQMesh	+	+	+	+	+	+	3-10 kEUR	18 kEUR
Kunak sensor box	+	+	+	+	+	+	3-7 kEUR	15-25 kEUR
Airsenseur	+	+	+	-	+	+	2,5kEUR	7,5 kEUR
AQY	+	+	+	+	+	+	3,5 kEUR	12 kEUR
Cairnet	+	+	+	+	+	+	6,6 kEUR	20 kEUR
POM	-	+	-	+	-	+	/	/
Praxis	+	+	+	+	+	+	5 kEUR	15 kEUR
AirVeraCity	+	+	+	+	+	+	10 kEUR	25 kEUR
PAII	-	-	+	+	+	+	200 EUR	600 EUR
PATS+	-	-	+	+	-	+	500 EUR	1,6 kEUR
MetOne (E-sampler)	-	-	+	+	+	+	5 kEUR	15 kEUR
SCI - 608	+	+	+	+	+	+	3,3 kEUR	20 kEUR
Airly	+	+	+	+	+	+	350 EUR	1,2 kEUR

Een aantal van deze sensorboxen kunnen van stroom voorzien worden door een zonnepaneel, waardoor ze makkelijker installeerbaar zijn op sommige plaatsen. De meeste systemen hebben een goed uitgewerkte visualisatie waar meetgegevens bekeken en verder geanalyseerd kunnen worden. Dit wordt besproken in Bijlage B.

De informatie die verzameld werd in deze studie kan nu verder gebruikt worden in een aantal vervolgotrajecten. De cases van de deelnemende gemeenten zullen verder uitgewerkt worden, en op basis van toepassing en technische vereisten kan een shortlist van bruikbare sensorboxen opgesteld worden. Deze informatie zal gebruikt worden om een gedetailleerd bestek op te stellen dat aansluit bij de vereisten van de gemeente. Daarnaast is het de bedoeling om de aangeleverde informatie te verwerken in een meer generisch selectietool. In het rapport wordt beschreven welke de meest relevante selectiecriteria zijn om redenerende vanuit de toepassing tot een overzicht van kandidaat sensorboxen te komen die het best aansluiten.

LITERATUURLIJST

Crunaire, S.; Redon, N.; Spinelle, L. 2018. 1ER Essai national d'Aptitude des Microcapteurs EAC) pour la Surveillance de la Qualité de l'Air: Synthèse des Résultats; LCSQA: Paris, France.

Feinberg, S.; Williams, R.; Hagler, G.S.W.; Rickard, J.; Brown, R.; Garver, D.; Harshfield, G.; Stauer, P.; Mattson, E.; Judge, R.; et al. Long-term evaluation of air sensor technology under ambient conditions in Denver, Colorado. Atmos. Meas. Tech. 2018, 11, 4605–4615.

Redon, N.; Delcourt, F.; Crunaire, S.; Locoge, N. (2016) Protocole de détermination des caractéristiques de performance métrologique des micro-capteurs-étude comparative des performances en laboratoire de micro-capteurs de NO₂ | LCSQA. <https://www.lcsqa.org/fr/rapport/2016/mines-douai/protocole-determination-caracteristiques-performance-metrologique-micro-cap>

Redon N., Delcourt F., Crunaire S., Locoge N., 2017. Protocole de détermination des caractéristiques de performance métrologique des micro-capteurs - étude comparative des performances en laboratoire de micro-capteurs de NO₂, Rapport LCSQA, mars 2017. <https://www.lcsqa.org/fr/rapport/2016/mines-douai/protocole-determination-caracteristiques-performance-metrologique-micro-cap>

Redon N., Crunaire S., Herbin B., Morelle E., Gaie-Levrel F., Amodeo T., 2018. Faisabilité de la mise en oeuvre d'un protocole pour l'évaluation en laboratoire de micro-capteurs pour la mesure des concentrations massiques particulières, Note technique LCSQA, juillet 2018. <https://www.lcsqa.org/fr/rapport/faisabilite-de-la-mise-en-oeuvre-dun-protocole-pour-levaluation-en-laboratoire-de-micro>

Papapostolou V, Zhang H, Feenstra B, and Polidori A. (2017) Development of an environmental chamber for evaluating the performance of low-cost air quality sensors under controlled conditions. Atmospheric Environment, 171: 82-90, 2017

Polidori, A., Papapostolou, V., Zhang, H., 2016. Laboratory Evaluation of Low-cost Air Quality Sensors - Laboratory Setup and Testing Protocol (Diamond Bar, CA). <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/protocols/sensors-lab-testing-protocol6087afefc2b66f27bf6fff00004a91a9.pdf>

Polidori, A., Papapostolou, V., Feenstra B., Zhang, H., 2017. Field evaluation of low-cost Air quality sensors: Field set-up and testing protocol. <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/protocols/sensors-field-testing-protocol.pdf?sfvrsn=0>

Spinelle, L.; Alexandre, M.; Gerboles, M. (2013) Protocol of Evaluation and Calibration of Low-Cost Gas Sensors for the Monitoring of Air Pollution; Publications of the European Union: Luxembourg.

Williams R., Long R., Beaver M., Kaufman A., et al. (2014) Sensor Evaluation Report. EPA 600/R-14/143 | May 2014 | www.epa.gov/ord

Williams R., Kaufman A., Hanley T., Rice J.; Garvey S. (2014). Evaluation of Field-deployed Low Cost PM Sensors; U.S. Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA, 2014.

BIJLAGE A



imec – IDLab – University of Antwerpen
Sint-Pietersvliet 7
B-2000 Antwerpen

Technical report
IDLab

IoT

network

comparison

Author(s):	Johan Bergs		
Date:	17-12-2019		
Keywords:	WiFi, LPWAN, NB-IoT, LoRaWAN, Sigfox		

- **Introduction**
- **WiFi as a Network Technology**

Many IoT devices nowadays come equipped with WiFi cards. WiFi was launched as a technology in 1997 and since has become ubiquitous. Since the original release, WiFi has gone through many different versions, each version typically increasing the maximum throughput significantly over the previous one.

WiFi is considered to be a local area technology; a typical range of a WiFi hotspots is up to 150m, if no obstacles are present between the hotspot and the end-user device. WiFi signals are, however, rather easily attenuated by objects such as walls, trees, and even persons, if those are present between sender and receiver. Moreover, the speed of a WiFi network is typically not fixed, meaning that the lower the signal quality becomes, either due to increasing distance between sender and receiver, or due to object blocking the direct path between sender and receiver, or both, the maximum throughput of the WiFi network will drop significantly. The rate at which this throughput is lowered depends on the version of WiFi that is used (b/g/a/n/ac/...), the frequency that is used (2.4 GHz or 5GHz), and the general capabilities of both sender and receiver.

An advantage of WiFi is that it is operating in unlicensed spectrum, more specifically in the 2.4 GHz and 5 GHz bands. “Unlicensed” means that anyone is allowed to set up a WiFi access point, as long as it follows some regulations defined in the WiFi standard, such as max. power output etc. WiFi can therefore be a very cheap technology, as it is ubiquitously available at low cost. Moreover, if one deploys their own WiFi network, the amount of data that is wirelessly transmitted from the sensor to the WiFi access point does not incur any cost. The only possible cost, apart from the electricity used by the AP, is the cost of the Internet connection for the access point. This Internet connection can be obtained in any regular way via an ISP.

There are, however, several things to keep in mind when using WiFi, depending on the use case:

- For indoor use, WiFi is a perfect solution, provided one can install one or more WiFi access points that are in range of the sensor devices to provide a network connection.
- Care must be taken to set up the WiFi security properly (e.g. WPA2/WPA2 Enterprise encryption). It should be noted that not all devices support all security technologies. At least WPA2 should be supported if security is important.
- Since WiFi is an unlicensed technology, operating a WiFi network in an area where other WiFi networks are already present, can lead to degraded results due to interference between the WiFi networks. This is especially the case when using the 2.4GHz band and less when using 5 GHz. However, not all end-user devices (and sensors) support the use of 5 GHz, forcing the use of the more easily interfered 2.4 GHz frequencies.
- The range of a WiFi access point is dependent on the environment (e.g. walls, trees, concrete, ... blocking the path between the access point and the sensor). If no obstacles are present, a range of up to 150m is possible, but this can go down to only several tens of meters in a scenario where many obstacles (or well insulated walls or windows) are present. An example would be an access point that is installed indoors that is intended to serve sensors located outdoors. In case of well-insulated buildings, this might give very bad performance (or even no connectivity at all). Outdoor access points do exist, potentially solving the problem of walls blocking the WiFi signals between an indoor or an outdoor environment. Those access points, however, are more costly to obtain and to install.

The main contrast between WiFi and the following technologies explained in this document, in the section on LPWAN technologies, is that those are long-range (up to 10 or more kilometres of range). SigFox and LoRaWAN both operate in unlicensed spectrum, whereas NB-IoT operates in licensed spectrum, just as e.g. LTE does. LoRaWAN is the only of those three LPWAN technologies that can also be rolled out by anyone, in contrast to SigFox and NB-IoT. This will be further covered in the next sections.

- **Overview of LPWAN-technologies**

There are a great number of different LPWAN (Low-Power, Wide Area Network) technologies available. With the “Internet of Things” that is becoming more popular, these technologies are currently being deployed worldwide. In this report, we considered only three well-known and currently widely supported technologies: Sigfox, LoRaWAN and NB-IoT.

This chapter gives a general overview of these three technologies. They each have their own unique characteristics, advantages and disadvantages. First, an overview per technology is provided. At the end of this chapter, the three technologies are compared in a summarizing table.

- **Sigfox**
- **Coverage and Business Model**

One of the first and best known LPWAN networks is Sigfox⁵. The first country to have nationwide Sigfox coverage was France, in 2014. At the moment, the Sigfox network gives good coverage in most parts of Europe. In Belgium, coverage is stated to be as good as complete at 99%. Figure 1 shows this graphically. This figure is taken from the Sigfox website. Moreover, Sigfox is quite willing to expand their network if the coverage is not so good in a specific location. At customer request, Sigfox is inclined to install an extra base station to solve coverage problems.

The business model of Sigfox is to provide one single Sigfox network per country, using a third party in each country to manage the network. In Belgium, this is done by Engie m2m⁶. As “Sigfox is Sigfox” in every country the network is available in, no roaming between operators is required should a device cross country borders. One does have to take into account, though, that Sigfox does not use the same frequency band in every country, so a device can only operate in countries that use the same frequency band as the origin country. For Europe, this is not an issue, as the same frequency band is used in every country.

In Sigfox, all data is sent to the Sigfox cloud and can subsequently be forwarded to the end user, as shown in Figure 2.

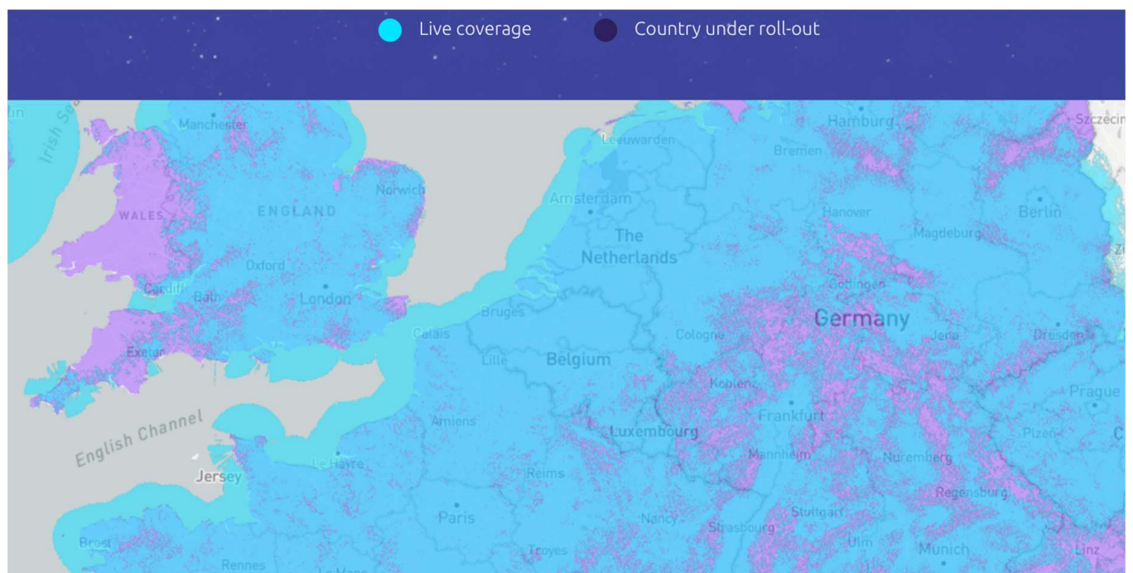


Figure 1- Sigfox Coverage

⁵ <https://www.sigfox.com>

⁶ <https://www.engiem2m.be>

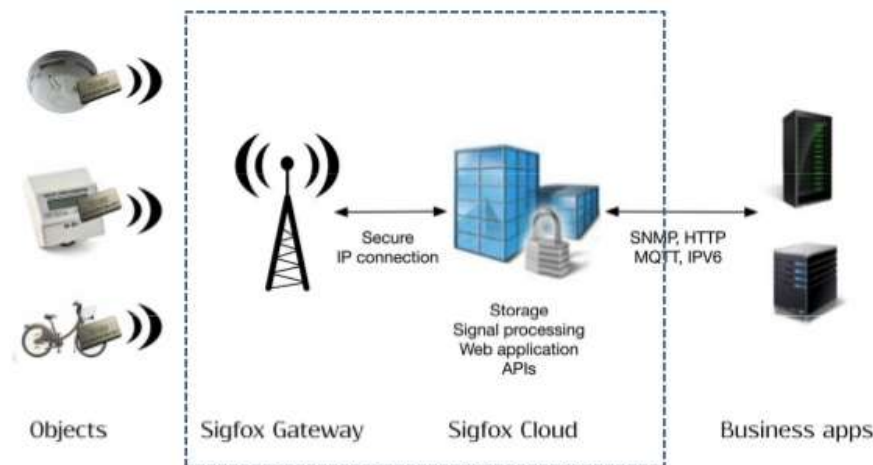


Figure 2 - Sigfox Architecture⁷

Since only third parties approved by Sigfox, can operate the Sigfox network, using this network is pretty straightforward: all that is needed is to pay a fee to the local operator for each device one wants to use. In Belgium, this can be done with Engie m2m. They offer several different options, ranging from € 3 to € 7 per device per year. The cheapest option allows you to transmit a maximum of two uplink messages per day (from device to network) of maximum 12 bytes, and no downlink messages (from network to device); the most expensive option allows 140 uplink and 4 downlink messages of maximum 12 and 8 bytes, respectively.

Sigfox is designed to have very good (also deep indoor) coverage and yet be very efficient in terms of power consumption. Of the three LPWAN networks considered in this document, one should expect that Sigfox will have the best deep indoor coverage.

- **Technical**

Sigfox uses patented technology in an unlicensed band (868 MHz in Europe). One of the consequences of using this band, is the requirement to conform to a legal requirement that states that each device may only use the spectrum in this band for a maximum of 1% of the time. So, for every second that is being used to transmit data, a device is required to remain silent for 99 seconds. This also explains the 140/4 message limit mentioned above. Messages are transmitted at a data rate of 100 bps. A message of maximum payload size (12 bytes) requires, including overhead, a transmission time of 2 seconds. Additionally, since there is no built-in mechanism to ensure successful reception of a message, in order to increase the chance of success, each message is sent three times.

This all leads to the stated limits:

- To transmit 12 bytes of payload, 2 seconds of airtime are required;
- Each message is sent three times, so every 12-byte message consumes, in total, 6 seconds of airtime.
- Since the spectrum can only be used for 1% of the time, for each 6 seconds airtime, 594 seconds need to be spent without transmitting.
- The above means that, at maximum, once every 10 minutes a 12-byte message can be sent. Once every 10 minutes translates to a maximum of 144 messages per 24 hours. Hence the limit of 140.

⁷ http://www.dash7-alliance.org/wp-content/uploads/2014/08/02-dash7_rfid_lpwan.pdf

A device can send an uplink message any time it likes, taking the above limits into account. So, typically, a Sigfox device will be “sleeping” (radio turned off completely) until it has something to transmit. This also complicates matters for receiving downlink messages (from network to device). Since the radio is turned off most of the time, a Sigfox device is unable to receive incoming messages at all times. Instead, there is a mechanism in place that allows the Sigfox device to signal the network (during transmission of an uplink message), that it will open a brief receive window afterwards. The receive window lasts 30 seconds. During this time, the Sigfox device will be listening on its radio for downlink messages. Summarizing: downlink messages cannot be transmitted in real time, but are buffered in the Sigfox network instead until a device signals it will open a receive window. Only then can the downlink message actually be sent. Consider a Sigfox device that only transmits one message every 24 hours. Even if it opens a receive window every time, it can take up to 24 hours for a downlink message to reach this device.

-
- **Conclusion**
- A Sigfox device is limited to sending a maximum of 140 12-byte messages per day and receiving a maximum of 4 8-byte messages per day.
- Therefore, Sigfox is suitable for applications that only need to transmit a low amount of data, both per transmission as in total per day.
- In Belgium, Sigfox subscriptions can be obtained via Engie m2m.
- Sigfox is designed to consume very little power, so battery lifetime of Sigfox devices can be very long.
- Sigfox is very limited with respect to downlink messages.
- There is no built-in reliability. Messages are sent three times in order to increase success of reception, but this is not guaranteed.
- **LoRaWAN**
- **Coverage and Business Model**

The technology considered in this report is called “LoRaWAN”. “LoRa” refers to the radio modulation technique patented by Semtech. “LoRaWAN” is the name for the actual communication protocol, that uses the LoRa modulation for transmitting data. The business model of LoRaWAN differs from that of Sigfox. Where Sigfox is operated centrally, from within Sigfox itself, using one operator per country they are active in, the LoRaWAN standard itself is governed by the LoRa Alliance⁸, which is an association of 500+ member companies, but without the model of “one operator per country”. In theory, anyone who is willing to do so, can roll out their own LoRaWAN network. This means that, in the LoRaWAN landscape, one can see private LoRaWAN networks, run by companies purely for their own needs, but also public LoRaWAN networks. In Flanders, three main public networks are currently active: The Things Network⁹, Wireless Things¹⁰, and Proximus¹¹ (the only fully commercial operator of the three).

Because the Proximus LoRaWAN network is available throughout most of Belgium, the remainder of this section will mainly focus on Proximus LoRaWAN. Of course, the technical details explained below, remain the same for other LoRaWAN networks. Only the business models and the coverage of the network itself may be different between the different operators.

⁸ <https://lora-alliance.org>

⁹ <https://www.thethingsnetwork.org>

¹⁰ <http://wirelessthings.be>

¹¹ https://www.proximus.be/en/id_cl_iot/companies-and-public-sector/solutions/connected-business/internet-of-things.html

Because LoRaWAN is not operated by one single party, but can be operated by anyone, LoRaWAN devices are registered to a specific LoRaWAN network. Roaming between networks is not (yet) available.

The Proximus LoRaWAN network offers an advertised coverage similar to that of Sigfox, namely 99%. This can be seen in **Error! Reference source not found..** In order to be able to use the Proximus network, it is necessary to contact them. Proximus currently does not offer any predefined subscriptions advertised publicly on their website.

It should be noted also that, even though technically and legally more frequent communications are possible, as explained further down, both Proximus (by enforcing with high fees) and The Things Network (by applying a Fair Use Policy) further reduce the amount of possible messages sent per day per device. In both cases, this comes down to a restriction to at most about 1 message per five minutes per day. This makes LoRaWAN also unsuitable if high volumes of data, or highly frequent transmissions, are required.



Figure 3 - Proximus LoRaWAN Coverage

Similar to Sigfox, messages sent via LoRaWAN are typically sent to a Cloud environment of the LoRaWAN operator. From there, the data can once again be forwarded to the end customer. This is illustrated in **Error! Reference source not found..**

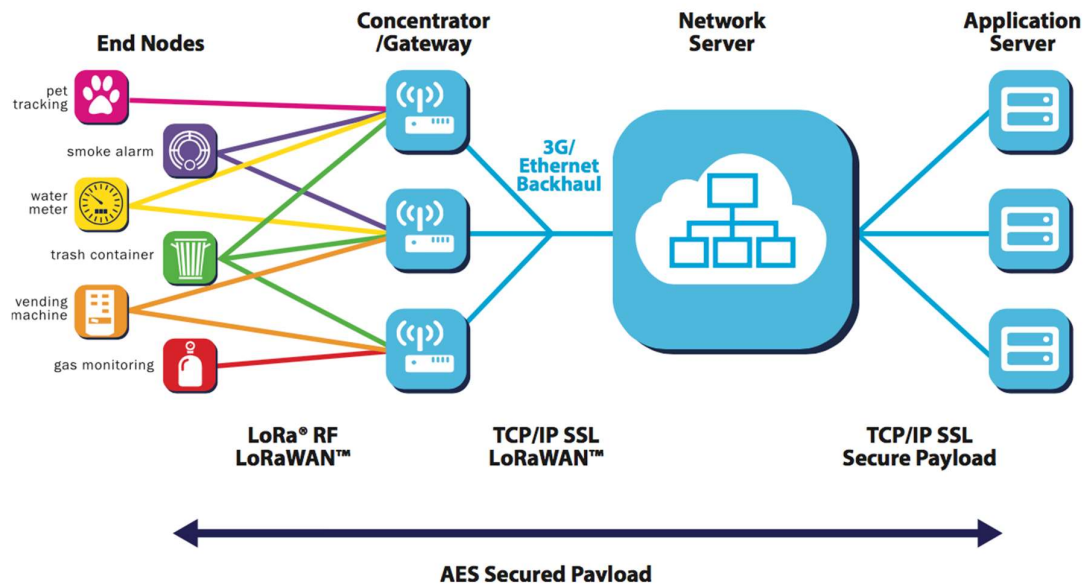


Figure 4 - LoRaWAN Architecture

- **Technical**

LoRaWAN uses the LoRa physical modulation in the same frequency band as Sigfox (868 MHz in Europe). This means that the same restriction that only 1% of airtime is allowed, also applies here. LoRaWAN distinguishes between three types of devices (called “classes”):

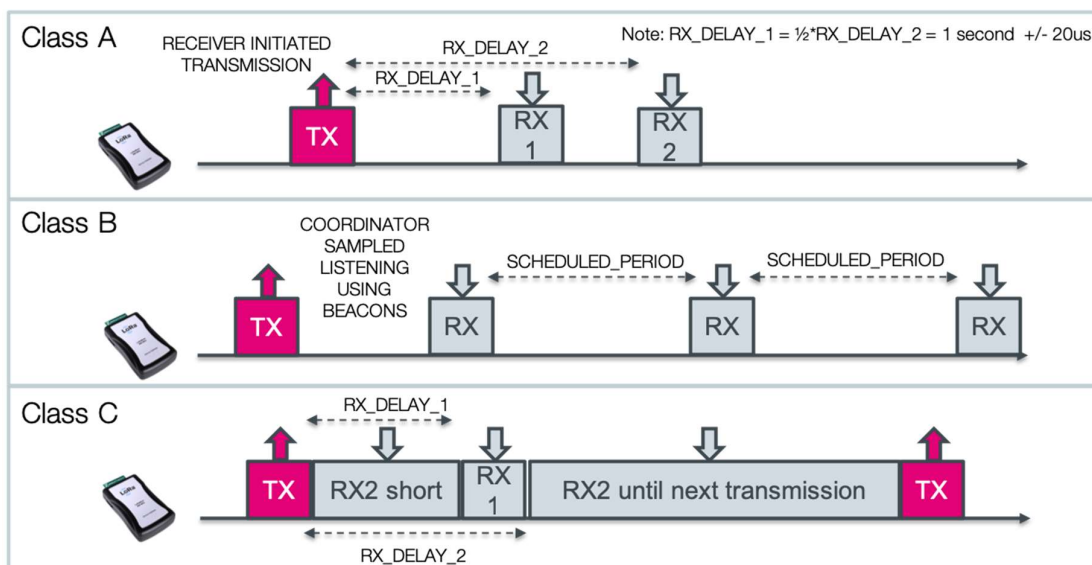
- Class A (the default): a battery powered device
- Class B: a battery powered actuator with fixed receive slots
- Class C: mains powered devices whose radio is constantly in receive mode, unless they are transmitting themselves.

Class A devices consume the least amount of energy, acting similar to Sigfox devices in the sense that, when they have nothing to transmit, they turn their radio into sleep mode. Only after transmitting themselves, they open up two short “receive slots” in which they are capable of receiving downlink messages. Outside of these slots, they cannot receive anything.

Class B devices consume more energy, but have recurring receive slots at fixed time intervals, even when they have nothing to transmit. This allows them to receive data more frequently.

Class C devices consume much more energy, as their radio is in a continuous receive mode, unless they need to actively transmit something.

The difference of these three classes is represented in **Error! Reference source not found..**

Figure 5 - LoRaWAN Classes¹²

Another difference with Sigfox is that the bitrate of LoRaWAN devices is not fixed. Depending on the quality of the signal, LoRaWAN devices can use different “spreading factors”, ranging from 7 to 12, where a lower number indicates a higher bitrate. With this lower spreading factor, to transmit the same number of bytes, a shorter time is required. Typically, the closer the LoRaWAN device is to the base station, the better the signal quality will be. The following table lists the spreading factors and their associated bitrate, while Figure 6 shows (on average) the relation between distance from the base station and spreading factor/bitrate. Because more time is needed to transmit the same message at higher spreading factors, more energy is required to do so.

Table 1 - LoRaWAN Spreading Factors

Spreading Factor (SF)	Bit rate
12	250 bps
11	440 bps
10	980 bps
9	1.7 kbps
8	3.1 kbps
7	5.4 kbps

• Conclusion

- LoRaWAN networks can be operated privately, or one can make use of publicly available networks.
- LoRaWAN devices can be divided into classes. Each class has its own characteristics, where trade-offs are made between latency and energy consumption.
- LoRaWAN does not have a specified maximum amount of messages that can be transmitted per day. However, the same duty cycle as for Sigfox (99% idle) must be observed.
- Further restrictions apply on most networks, reducing the amount of data one is able to send per device per day.

¹² Image made by Jeroen Hoebeke (imec – IDLab – UGent)

- LoRaWAN is also designed to consume very little power, so battery lifetime of LoRaWAN devices can be very long. A separate comparison on power consumption is added later in this report.
- Downlink messages (towards class A devices) can only be sent after the device itself sent an uplink message.

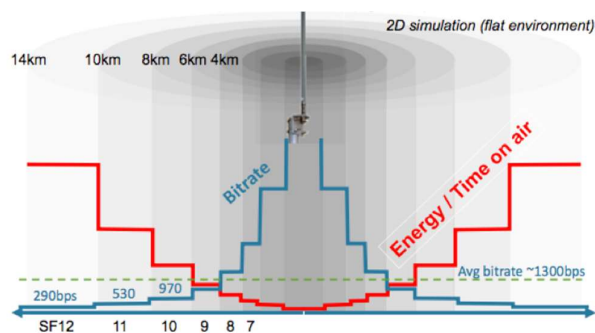


Figure 6 - LoRaWAN Spreading Factor vs Distance¹³

- **NB-IoT**
- **Coverage and Business Model**

NB-IoT (NarrowBand – Internet of Things) is a cellular technology, operating in the licensed spectrum as opposed to Sigfox and LoRaWAN (operating in the unlicensed spectrum). Therefore, only mobile network operators having a valid cellular license can roll out an NB-IoT network (e.g., in Flanders: Orange, Proximus and Telenet). Orange is currently the only operator that offers nation-wide NB-IoT coverage in Belgium. Telenet and Proximus are in the process of deploying this technology.

NB-IoT is the newest of the three technologies compared in this report. It offers the highest bitrate, but also the highest energy consumption. As NB-IoT is offered only by mobile network operators, one needs to apply for subscriptions via them.

For Orange, the “basic” offer ranges from € 11 to € 18 per device per year, which allows one to consume from 1MB/month up to an unlimited amount of MB/month. Unlimited needs to be interpreted very carefully, as currently, Orange states on their website it is subject to a fair use policy: *“Fair Use: we expect the average data sent per day not to exceed 10MBytes. In case this Fair Use Policy is not respected, your access to Orange Maker can be cut.”* Industrial and tailor made offers are also available, but the pricing here depends on the data volume used for the industrial offers, and is subject to a specific request to Orange for the tailor made offering. See <https://business.orange.be/nl/business-oplossingen/internet-things> for more information.

Telenet also only offers pricing for a “starter” bundle on their website. The business model here is different, as the starter bundle comprises of a pre-paid SIM card that allows 12MB of data to be sent, costing € 10,0. The 12 MB is valid for one year, after which it expires. Again, for larger deployments or deployments requiring a higher data consumption, Telenet needs to be contacted directly for an offer.

<https://www2.telenet.be/nl/business/producten-diensten/internet-of-things/iot-m2m-sim-kaarten-aanvragen/> has more information.

Finally, Proximus also offers no detailed pricing information on their website. The information imec has from Proximus is confidential, so cannot be shared as such to third parties. It can be disclosed, however, that the Proximus pricing is dependent both on the amount of active SIM cards and on the

¹³ <https://datatracker.ietf.org/meeting/96/materials/slides-96-lpwan-9>

data consumption per month. Prices vary between a few euro's/month/card, up to > € 50/month/card.

https://www.proximus.be/nl/id_cl_101/bedrijven-en-overheden/oplossingen/verbonden-business/internet-of-things.html contains contact information.

As NB-IoT is a cellular based technology, the same antennas are used as for the 4G/LTE signals for mobile phones. The NB-IoT coverage can be expected to be better than this of the 4G/LTE network, as NB-IoT requires less signal power to operate compared to standard LTE-equipment.

- **Technical**

NB-IoT is a cellular technology, so it makes use of a simplified version of the LTE backend network, as shown in Figure 7. Again, an “IoT platform” is offered, which is basically a cloud-based service where the data is sent to and where the end-user can retrieve it.

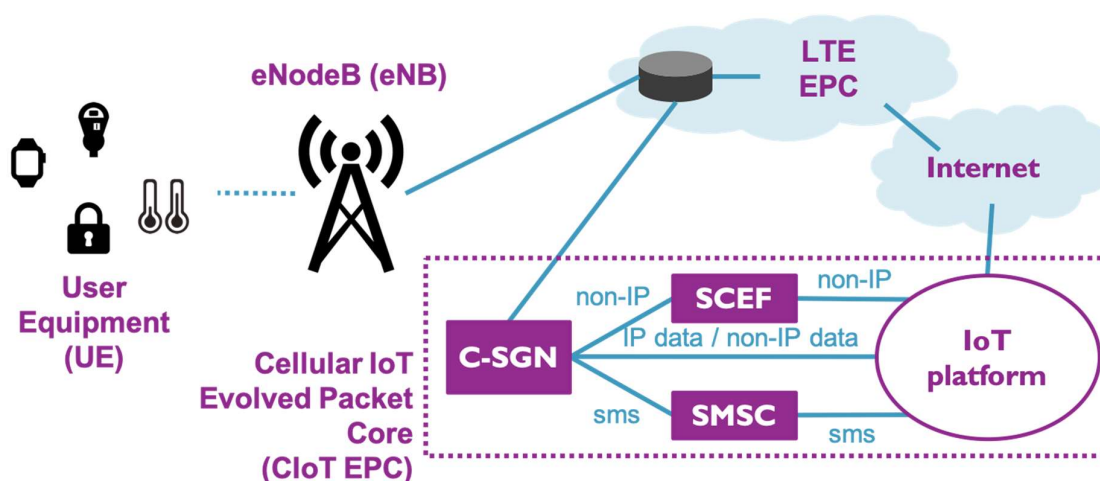


Figure 7 - NB-IoT Architecture

The term NB-IoT as such can be used to indicate multiple different technologies, but the variant used in the test is characterized with a maximum throughput of 250 kbps downlink and 20-250 kbps uplink. Other technologies, such as LTE-Cat M1 are often referred to as NB-IoT as well, but as they are intended for higher throughput, low latency applications, and as such are not considered in this report. Data rates for LTE-M can go as high as 1 Mbps, or roughly 4 times the speed of NB-IoT, while battery consumption is similar. It is to be expected that the coverage for LTE-M is similar as for classical 4G/LTE, while NB-IoT has a better deep indoor coverage.

The transmission time for NB-IoT is once again dependent on signal quality, as is the case in LoRaWAN. Figure 8 gives an indication of the expected time to transmit a 100-byte packet with 99% reliability. As the link budget increases (i.e. the quality decreases), NB-IoT uses different, more robust coding schemes in order to maximize the success of transmission. The more robust the coding scheme, the longer it takes to transmit the same amount of data

Lastly, NB-IoT can be less energy efficient than LoRaWAN and Sigfox because, being a cellular technology, periodic signaling is required. However, this is mitigated by the fact that an NB-IoT device can also go to “Power Save Mode”, which is essentially the same as a Sigfox or LoRa device going to

sleep. The maximum duration of this power save mode is 12.1 days, so essentially, in an application where a periodic transmission is expected (e.g. at least once a day), the sleep phase is comparable.

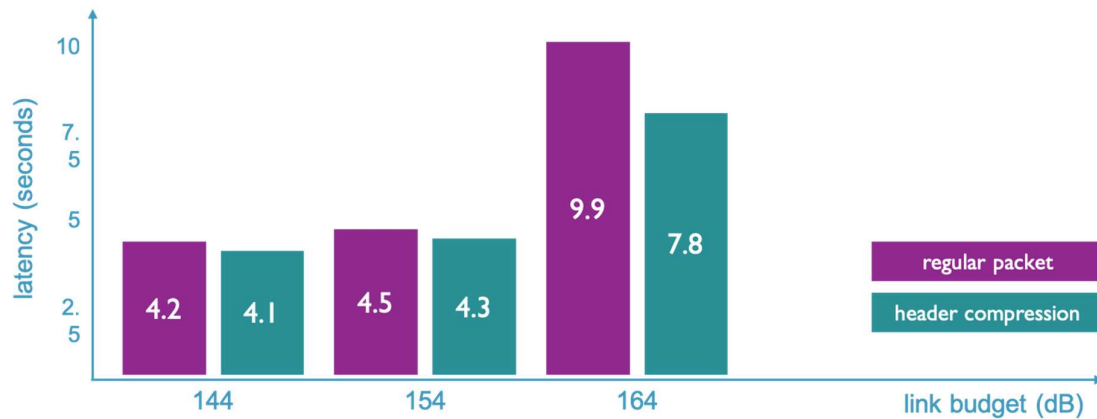


Figure 8 - NB-IoT Latency¹⁴

• Conclusion

- NB-IoT networks can only be operated by mobile operators since licensed spectrum is used.
- NB-IoT is a name that is used for several different technologies. This report only focuses on the NB-IoT technology that is most comparable to Sigfox and LoRaWAN (Low-Power).
- NB-IoT does not have a specified maximum amount of messages that can be transmitted per day. The amount of data that can be sent is typically enforced by the type of subscription that is taken from the operator. This is typically expressed in a maximum amount of MB/month, as is common with normal mobile data subscriptions.

• Comparison

In the previous sections, an overview was given of three LPWAN technologies: Sigfox, LoRaWAN and NB-IoT. As a conclusion, a summary is given below that compares these three technologies. Both latency, packet sizes, etc. (relating to the possibilities of each technology), as well as energy consumption are considered, as this is important for the lifetime of battery-operated devices. Table 2 highlights the main technical differences of the three technologies considered, regarding max. payload size and transfer time.

Table 2 - Comparison between Sigfox, LoRaWAN and NB-IoT

	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT
Downlink peak rate	100 bps	0.25 – 5.4 kbps	250 kbps
Uplink peak rate	600 bps	0.25 – 5.4 kbps	20 / 250 kbps
Max. payload size	12 bytes	51 – 242 bytes ¹⁵	512 bytes
Business model	One network	Private and public networks possible	Mobile Operators only Network Operators only

¹⁴ **Source:** M. Chen et al., "Narrow Band Internet of Things," *IEEE Access*, vol. 5, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2751586

¹⁵ Depending on spreading factor

Target power consumption	Very low power	Low to very low power	Low power
Other Remarks	Max. 140 UL messages / day Max. 4 DL messages / day	99% sleeping Max. 1% sending	-

Additionally, in order to assess the power consumption of every technology, imec made a comparison of the three technologies using a specific module (chip) for each technology. Because overall energy consumption is highly dependent on the duty cycle (i.e. how long is a device sleeping vs. how long is it actively transmitting or receiving), the duty cycle of all three technologies is compared in the three figures below:

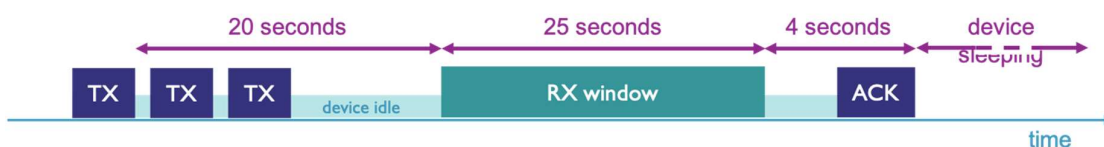


Figure 9 – Sigfox Duty Cycle

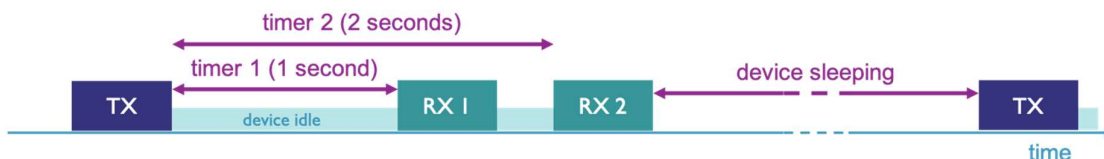


Figure 10 – LoRaWAN Duty Cycle

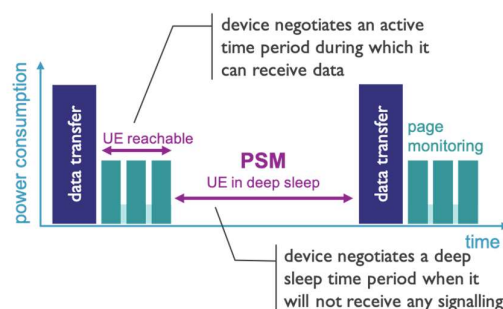


Figure 11 – NB-IoT Duty Cycle

In order to make the overall power consumption comparable, a data simulation was set up where, using each technology, a 12-byte payload was periodically transmitted. We chose 12 bytes because this is the maximum allowed payload for Sigfox. The payload sent is the GPS coordinate retrieved from an onboard chip. The following table summarizes the technical setup of the simulation:

Table 3 - Simulation Setup

	Sigfox	LoraWAN	NB-IoT
Radio Module	Atmel ATA8520E	Semtech SX1272	uBlox SARA N210
TX power (dBm)	14	23	20
Power (mA)	32.7/10.4/0.05/0.00015	11.2/125/1.4/0.0001	46/220/6/0.003
[RX/TX/idle/sleep]			

Payload size (bytes)
Microcontroller
GPS chip

12

ARM Cortex M3 @ 32 MHz (3.38 mA power consumption)

uBlox ZOEM8B (29 seconds acquisition at 34.5 mA)

The results of the simulations regarding energy consumption can be found in the graphs below. Figure 12 considers only the energy consumption of the radio itself. It shows the amount of bits that can be sent per Joule of energy consumed (more is better). The figure shows how this amount of bits per Joule changes w.r.t. the transmission interval. Figure 13 considers the processing unit + radio, using a 1-hour transmission interval, and shows the battery lifetime, in years, for batteries of different capacities. Figure 14, finally, shows the battery lifetime, in days, for the unit as a whole, including the GPS chip.

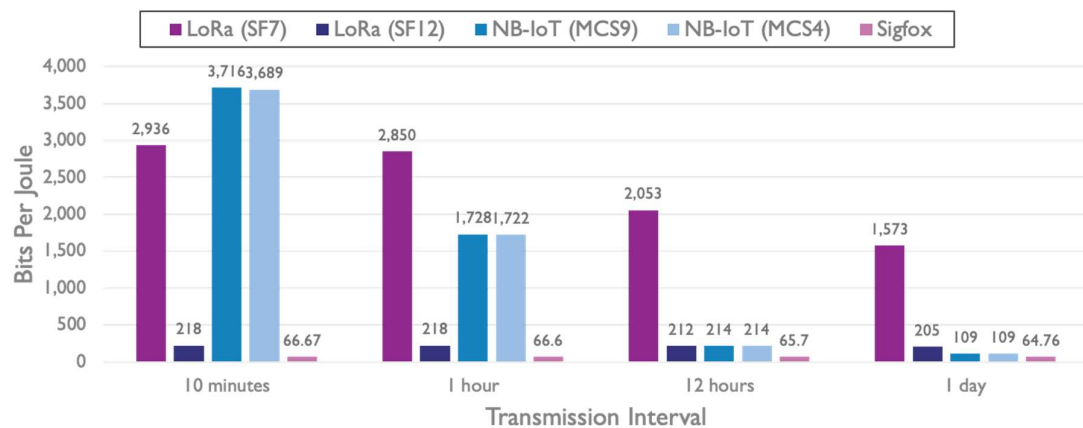


Figure 12 - Considering Only Radio Energy Consumption

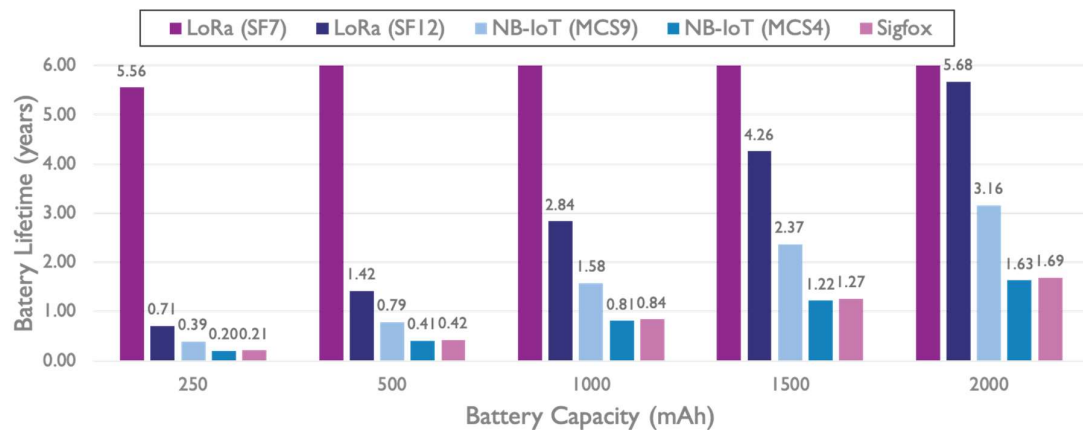


Figure 13 - Device Lifetime as Function of Battery Capacity (Radio + Microcontroller - 1 Hour TX Interval)

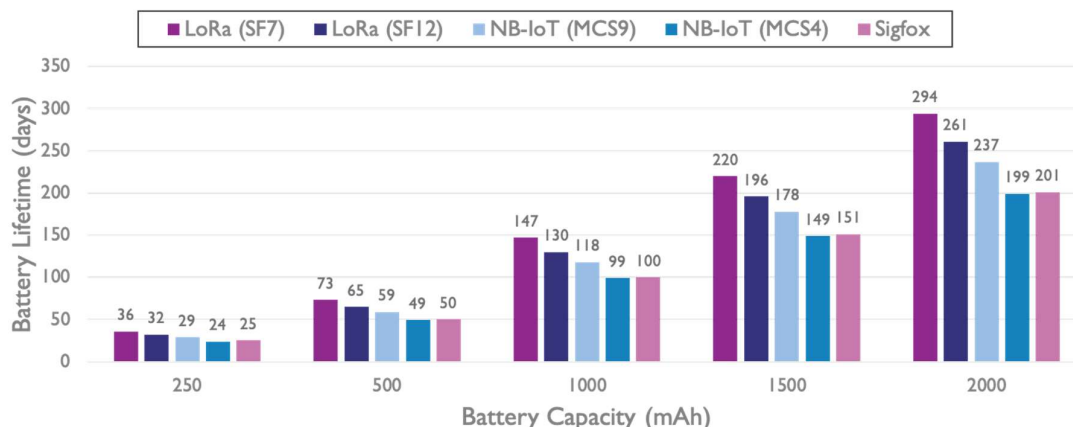


Figure 14 - Device Lifetime with GPS Localization (Radio + Microcontroller + GPS; 1 Hour TX Interval)

As can be seen from the results above, if only the radio is considered, NB-IoT seems to be most energy efficient, certainly at lower transmission intervals (measured in bits/Joule). For larger transmission intervals, LoRaWAN consumes the least amount of energy. However, since in all three technologies, the radio energy consumption is only a small part of the total energy consumption of the device, if we take everything into account, as in Figure 14, the differences are actually very low overall.

The conclusion is that, while the different radio technologies have different power characteristics, it is also very important to keep the total power consumption of the device under test into consideration, as depending on the power consumption of the sensor/processor part of the device, the radio consumes only a negligible amount of the total energy.

Summarizing:

- NB-IoT is the most energy efficient for short transmission intervals, LoRa for long intervals
- A 1500 mAh battery is enough to reach 1-year battery lifetime at 1 hour transmission interval
- GPS significantly limits battery life, to less than 1 year even for a 2000 mAh battery

BIJLAGE B

Voorbeelden visualizaties.

→ Vaisala, AQT400-series

→ AQMesh

Zie <https://www.aqmesh.com/product/data-access-package-options/> voor meer info over de verschillende data access formules.

Data access

AQMesh secure data access and online pod management

AQMesh is available with a range of secure data access packages tailored for varying levels of requirements. The table below provides an overview of which features and benefits are available with each option, with further details about the various packages outlined underneath.

	Basic	API	AQMeshData.net	AirMonitors.net
Data access	Secure online folder	API feed	Secure login & CSV download	API feed or CSV download
Data collection	Near real-time	Near real-time	Near real-time	Near real-time
Data delivery	Weekly	On demand	On demand	On demand
Data storage	12 months	12 months	12 months	5+ years
Secure login access	X	X	✓	✓
Change pod settings	X	✓	✓	✓
Failed sensor alerts	✓	✓	✓	✓
Cross-gas affected sensor alerts	✓	✓	✓	✓
Destabilised sensor alerts	✓	✓	✓	✓
Sensor rebasing	✓	✓	✓	✓
PM moisture filter	✓	✓	✓	✓
Additional features				Email alerts Data validation Linear regression analysis OpenAir analytics Air Now compatibility Dynamic time averaging Powerful API in JSON and CSV Advanced graphing Mapping

→ Kunak

KUNAK CLOUD

Open data server

[Ask us for a quote](#)



Advanced platform for the analysis and remote management of devices

Kunak Cloud is a web platform in the cloud, for the configuration and remote management of the devices and the detailed analysis of their data. It enables storing, processing, analyzing and exporting the data collected by any device or sensor, offering detailed information and advanced processing, and providing autonomy, mobility and scalability. Through the **Kunak API**, it allows to integrate the information collected by the Kunak devices and other external equipment in any client's ERP or SCADA.

Also installable On-Premises and on the Mobile APP **Kunak Watcher**:

- Multi-device and multi-sensor remote configuration
- User profiles, permissions and access to devices
- Geo-located data
- Real-time multi-device and multi-sensor analysis
- Advanced statistics
- Traceability of actions
- Advanced statistical processing

[Water & Utilities](#)
[Industry 4.0](#)
[Smart Products](#)

BENEFITS

SPECIFICATIONS

SERVICES

Benefits



EASY AND QUICK INSTALLATION

- Plug & play
- No installation required
- Without development or administration
- Different user profiles within a single account
- Remote management and configuration of equipment
- Accessible from any device and location
- Allows sharing information between users

ADDED-VALUE INFORMATION

- Information 24/7
- Geolocation and equipment health status
- Operation conditions
- Configuration and sending of warnings and alarms
- Information in graphical and tabular format
- Multiparameter and multi-device graphics

REMOTE MANAGEMENT AND ACTION

- Information 24/7
- Single device and/or multi-device configuration
- Incident management
- User management
- Remote configuration and operation
- File export

CUSTOM SERVICES

- Configuration software
- Installable On-Premises
- Parameterization of data
- Open API and connectors
- Customizable dashboard

KUNAK WATCHER

Android App

[Ask us for a quote](#)



Direct access to your devices and sensors from Smartphone and Tablet

Kunak Watcher is an Android App with a simple and intuitive design for the fast access to sensor data, the status control and the geolocation of the devices.

- Data visualization in precise graphs and boards.
- Operational status of all sensor nodes at a glance.
- Customized notifications of thresholds and equipment life status.
- Powerful portable sensor data monitor.
- Devices location on map.

[Smart Environment](#)

[Water & Utilities](#)

[Industry 4.0](#)

[Smart Products](#)

KUNAK ON PREMISES

Private data Server

[Ask us for a quote](#)



Installable private data server in ERP, SCADA, CMMS, CRM or MES

Kunak On Premises is an installable communications server for the VPN transmission of 100% reliable and real information coming directly from the sensors and its integration into the Client's management systems, whether ERP, SCADA, CMMS or MES. It allows the export of data in any format: JSON, CSV, TXT, XML, OPC, OPC UA or any other custom.

- Java Communications Server
- MySQL database for temporary or permanent storage and queuing of configurations
- Bi-directional communications enabling remote firmware configurations and upgrades
- Reliable communications that guarantee the final delivery of information
- Efficient proprietary protocol for reduced battery and mobile data consumption
- Easy installation: just need a JVM and MySQL
- Easy integration with SCADA systems via ODBC/OPC
- Data privacy along the entire communications chain

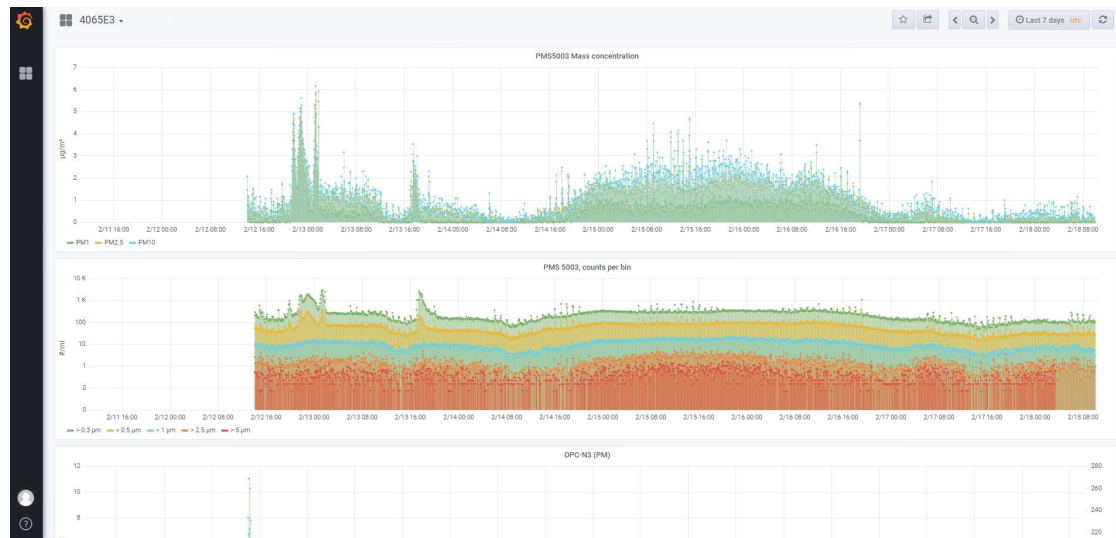
[Water & Utilities](#)

[Industry 4.0](#)

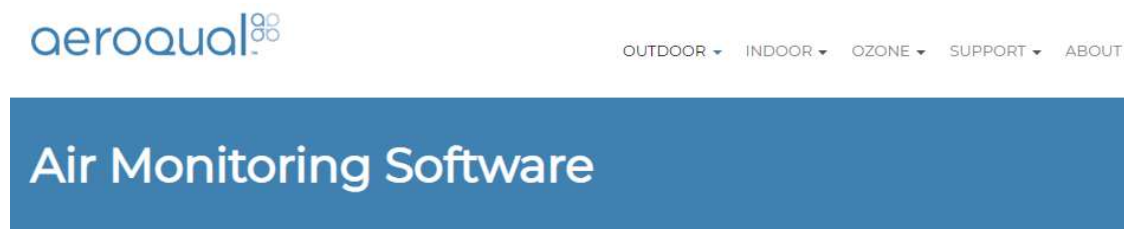
[Smart Products](#)

→ AirSensEur

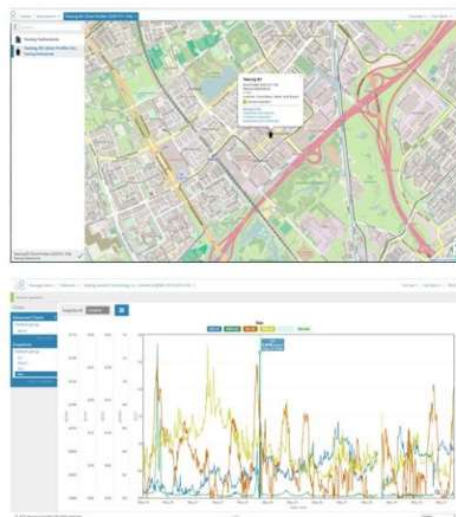
Een Grafana dashboard gekoppeld aan de database wordt gebruikt om de data te visualizeren.



→ Aeroqual



Air Monitoring Software



FEATURES

- ⊗ Connect to your instrument remotely via WIFI, Ethernet, or cellular
- ⊗ See your instruments on a map
- ⊗ View and download your data in real-time
- ⊗ Plot your data using advanced charting functions
- ⊗ View your entire network of instruments on a single chart
- ⊗ Select averaging period – 1 min, 30 min, 1 hr, 2 hr, 4 hr, 8 hr, 12 hr, 24 hr
- ⊗ Use wind roses and pollution roses to identify pollution sources
- ⊗ Set up SMS and email alerts in response to significant events
- ⊗ Push data via FTP or email data direct to chosen recipients
- ⊗ Give access to service technicians or Aeroqual engineers for advanced technical support
- ⊗ Record all service and maintenance events in the online journal
- ⊗ Calibrate your instrument remotely (using the integrated calibrator option).

VERSIONS AVAILABLE

- ⊗ Aeroqual Support – for technical support only
- ⊗ Aeroqual Plus – for advanced data users, and technical support

OVERVIEW WHAT'S INCLUDED DOWNLOADS

Air monitoring software comes standard when you purchase an Aeroqual instrument, such as the AQM 65, AQS 1, AQY 1, Dust Sentry or Dust Profiler. Accessed through a custom-built software interface, the software gives you and other trusted users secure access to air quality data in real-time. It also enables engineers to provide remote technical support and servicing. The software is browser based so there's nothing to install – simply connect your computer, tablet or phone, open your browser and away you go. Take a look at the [Aeroqual Cloud / Connect Infographic](#) to see how it works.

AEROQUAL CONNECT

Aeroqual Connect is the instrument operating software located on the embedded PC in the instrument. Use Connect to:

- Communicate directly with your instrument
- Service the instrument when on site
- Download data directly to your PC, phone, tablet

Connect is included in the purchase of every air quality system from Aeroqual. Users get a free unlimited license to the software. The software can be updated remotely provided users have enabled Aeroqual Cloud.

AEROQUAL CLOUD

Aeroqual Cloud gives you and other trusted users access to all of your instruments via secure third party servers. Use Cloud to:

- Communicate with your instrument(s) from anywhere at anytime
- Enjoy advanced charting features (e.g. wind and pollution roses)
- Get advanced technical support from Aeroqual engineers

There are two versions of Aeroqual Cloud available (see What's Included). Aeroqual Support is included free of charge and Aeroqual Plus includes extra features that are paid for on a yearly basis.

OVERVIEW WHAT'S INCLUDED DOWNLOADS

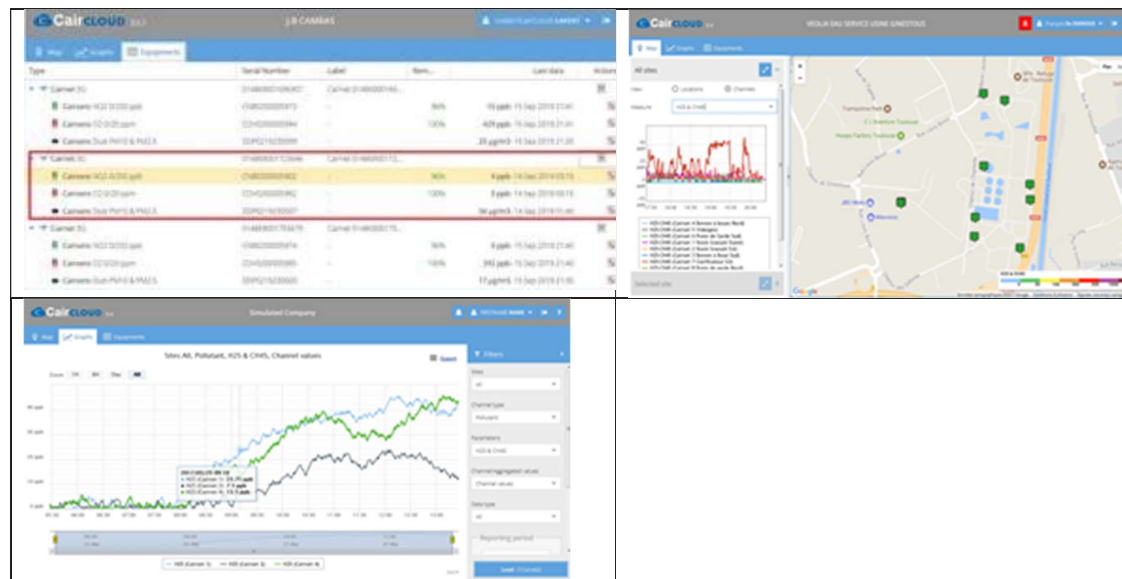
There are two versions of Aeroqual Cloud available.

Support allows you to connect your instrument to the Aeroqual server and helps the Aeroqual support team resolve any technical issues quickly.

Plus proves sophisticated data visualization tools such Pollution Roses and multi-parameter charts, you can also receive automatic data exports and text alerts with Aeroqual Plus.

	Support	Plus
Table view	Yes	Yes
Basic charts	No	Yes
Calibration & Maintenance	Yes	Yes
Diagnostics	Yes	Yes
Map view	No	Yes
Journal	Yes	Yes
Download data in CSV	No	Yes
Advanced charts	No	Yes
Network view	No	Yes
View historical data	1 month	Unlimited
Wind roses	No	Yes
Pollution roses	No	Yes
SMS / Email alerts	No	Yes
Set customized sensor units	No	Yes

→ Cairnet



→ **POM**

/

→ **Praxis****Infrastructure**

All South Coast Science device-side and analytic software is open source and written in Python 3. Data formats are JSON for environmental data and CSV.

OpenSensors community edition connectivity

Enables data publishing, subscription and storage using the OpenSensors community edition, providing free-of-charge use for public data.

Delivery: Available now.

OpenSensors building management dashboard connectivity

Enables data publishing, storage and OpenSensors dashboard access. Ideal for urban and internal air quality monitoring as part of a commercial building management suite of sensors and tools.

Delivery: Q2 2018.

Amazon Web Services Internet of Things (AWS IoT)

Enables data publishing, subscription and storage using the Amazon Web Services IoT and DynamoDB systems. Available as a managed service from South Coast Science. Alternatively, customers may run the same services on their own AWS accounts under licence from South Coast Science.

Delivery:

Core device, data consumer and storage available now as a managed service. Available under licence: end Q3 2018.

Automated web management tools and dashboard available incrementally during 2018.

Web data dashboard

A simple web dashboard for the display of timeline environmental and device status information from individual devices. Functionality is growing, in consultation with South Coast Science customers.

Delivery:

Using OpenSensors community edition back-end: available now.

Using AWS back-end: available end Q1 2018.

All South Coast Science device-side and analytic software can be accessed on GitHub.

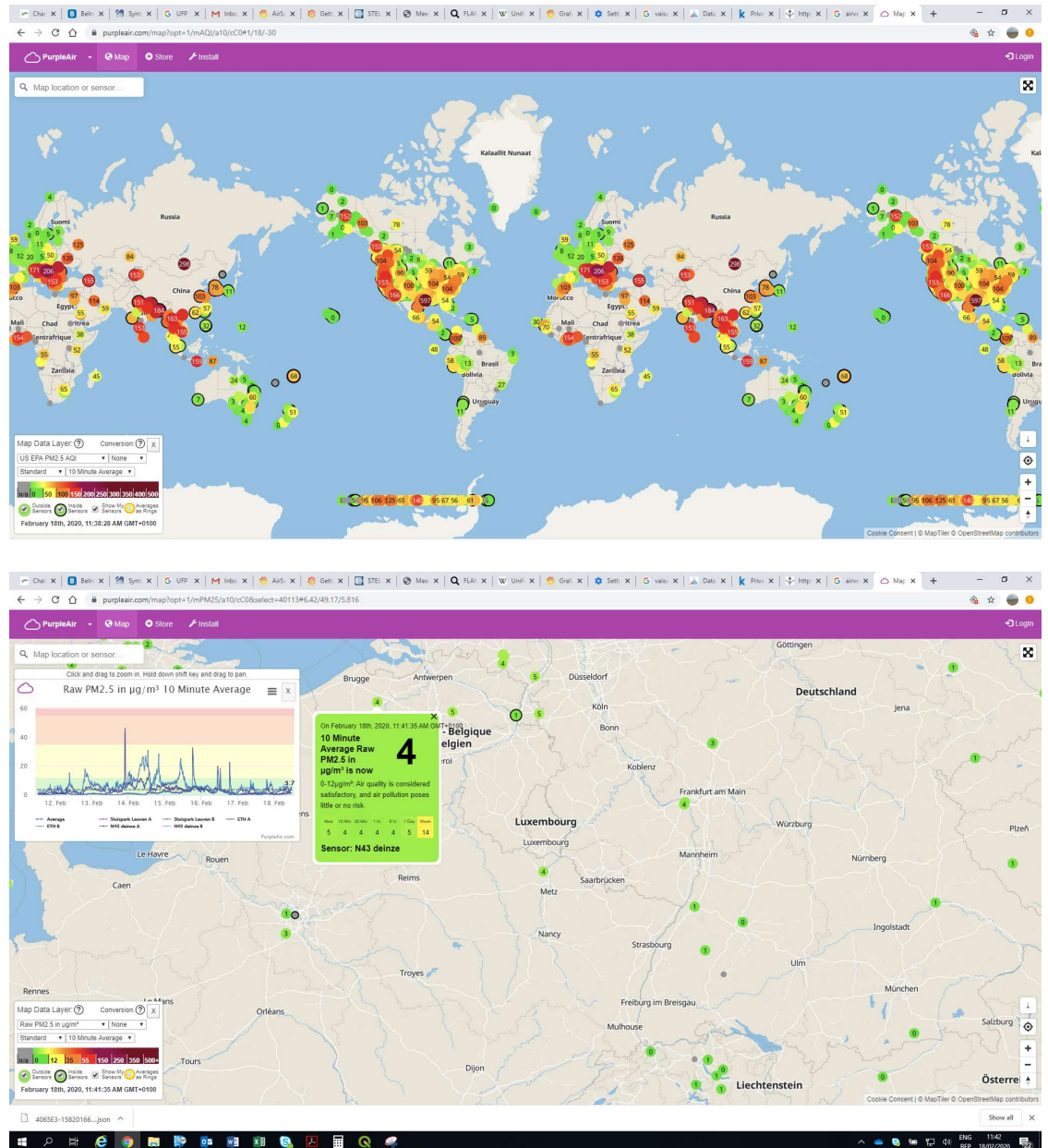
→ **AirVeraCity**

Geen info

→ **PAII**

Kaart met locaties waar metingen uitgevoerd worden. Klikken op meetpunt geeft tijdreeks.

Zie bv. <https://www.purpleair.com/map?opt=1/mPM25/a10/cC0&select=40113#6.42/49.17/5.816>.



→ PATS+

Logger software (PICA).

System Requirement:

- Windows 64-bit Operating system (7 or any later version of windows)
- Latest .NET framework installed
- Virtual COM port drivers installed (automatic for most Windows OSs)

**PICA Software Features:**

- Launches PATS+ and SUMs iButtons, including setting the log interval, adding reference notes, and choosing GPS location.
- Downloading PATS+ and SUMs data
- Particle concentration estimates based on internal lab-based calibration
- Option to include field-based adjustments
- Excel output file with PM estimate
- Interactive graphical representation of real time data
- Map of GPS coordinates
- Can merge PATS+ with SUMs data and save in a single file
- Can image multiple files and metrics on a single plot
- Statistical analysis of collected data
- Excel output file with PM estimate and statistical calculations

→ **MetOne**

Data Collection

Optional Air Plus is a complete communications data collection and data reporting tool.

This software supports cellular data modem, radio, or direct connection communication for data collection and generates summary reports and graphs from the recorded data. Comet software, included with each sampler, provides easy to use terminal access to the E-Sampler data.

→ **SCI – 608**

Software

Cloud: For instrument and data management. Runs on secure servers accessed via web browser.

Geen voorbeeld gevonden.

→ Airly

Kaart met meetlocaties, ingekleurd volgens concentratie. Niet enkel Airly sensors worden getoond, ook meetstations uit het referentie meetnet (bv. in België). Klikken op de meetpunten geeft bijkomende info over metingen op dat punt.

